

# **Die Entwicklung der Auflösung der Aufmerksamkeit**

Von der Pädagogischen Hochschule Karlsruhe zur Erlangung  
des Grades einer Doktorin der Philosophie (Dr. phil.)  
genehmigte

## **Dissertation**

von  
Kerstin Wolf  
aus Bad Orb

2014

Erstgutachter:

Prof. Dr. Till Pfeiffer

Zweitgutachter:

Prof. Dr. Christian J. Fiebach

Fach:

Psychologie

Abgabetermin der Dissertation:

14. Mai 2014

## **Dank**

Ich möchte mich an erster Stelle bei Prof. Dr. Till Pfeiffer bedanken, der mir diese Promotion in dieser Form ermöglichte und mich bei der Umsetzung dieses Forschungsvorhabens in vieler Hinsicht auf herzliche Weise unterstützt hat. Mein ganz besonderer Dank gilt Prof. Dr. Christian Fiebach für die unkonventionelle und unkomplizierte Aufnahme in seine Arbeitsgruppe und für seine wertvolle Unterstützung während der Promotion, vor allem bei der Konzeption, Durchführung und Auswertung der MRT-Studie, die er mit seinem Engagement, wertvollen Anregungen und Ideen sowie fachlichen Diskussionen wesentlich gefördert hat.

Darüber hinaus bedanke ich mich bei allen Kollegen aus der Arbeitsgruppe für Neurokognitive Psychologie für die angenehme Arbeitsatmosphäre und Hilfe jeglicher Art, insbesondere bei Kai Ueltzhöffer für seine geduldige Unterstützung in allen Fragen der Programmierung, bei Janosch Linkersdörfer für die Bereitstellung der Kinder-MRT-Infrastruktur und bei Lena Galeano, die im Rahmen ihrer Diplomarbeit an der Datenerhebung für die fMRT-Studie beteiligt war. Ganz herzlich bedanke ich mich auch bei den Mitgliedern des früheren fimlab in Heidelberg für die freundliche Aufnahme in ihre Arbeitsgruppe: Christine Stelzel, Ulrike Basten, Andrea Gäbel und Ruth Schmitt. Vielmals möchte ich mich bei Jasper van den Bosch für seine unglaubliche Hilfsbereitschaft und Unterstützung bei der Vorbereitung und Durchführung der MRT-Messung bedanken. Dr. Ulrike Nöth, Julia Heiken und Sandra Anti vom Brain Imaging Center Frankfurt danke ich für die hilfreiche Unterstützung während den fMRT-Messungen. An der Probandenkoordination und der Datenerhebung der Experimente waren eine Reihe von studentischen Hilfskräften beteiligt: Annika Huhn, Nicolas Schrick, Mirja Buehler, Denise Winter, Matthias Schneider, Lisa Wolf, Alexandra Tinnermann, Verena Zok und Anna Edel. Ihnen danke ich für ihren Einsatz. Für seine geduldige Unterstützung bei der Programmierung der Filmsequenzen gebührt Markus Binzler besonderer Dank.

Ganz herzlich bedanke ich mich bei den Schulleitern und Lehrern der Werner-von-Siemens-Schule Karlsruhe, der Martinus-Schule Bad Orb und der Friedrich-August-Genth-Schule Wächtersbach für ihre Bereitschaft, die Untersuchungen an ihren Schulen durchzuführen und für ihre Unterstützung während der Erhebungen. Ebenso danke ich den Eltern der Kinder, die an der fMRT-Studie teilgenommen haben, für ihr Engagement im Rahmen der aufwendigen Erhebung. Besonderer Dank gebührt natürlich den Versuchsteilnehmern, den großen wie den kleinen, ohne die diese Arbeit nicht möglich gewesen wäre.

Bedanken möchte ich mich außerdem bei Lena Buckert, Jasper van den Bosch und Sebastian Pichlmeier für das Korrekturlesen dieser Arbeit und ihre Rückmeldungen. Meinen Freunden danke ich für die großen und kleinen Hilfen und ihre Geduld vor allem während des letzten Jahres. Ganz besonders herzlich danke ich Regina Kessler für ihre Unterstützung in den letzten Monaten. Das war wirklich großartig. Schließlich gilt mein ganz besonderer Dank meinen Eltern, Kornelia und Kurt Wolf, für die Unterstützung über all die Jahre, die mir sehr wichtig war.

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung .....</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Theoretischer und empirischer Hintergrund .....</b>	<b>4</b>
2.1	Aufmerksamkeit .....	5
2.1.1	Selektive visuell-räumliche Aufmerksamkeit .....	5
2.1.2	Aufmerksamkeit als Ressource .....	7
2.1.3	Grenzen der visuell-räumlichen Selektion .....	9
2.2	Auflösung der Aufmerksamkeit .....	9
2.2.1	Definition .....	10
2.2.2	Experimentelle Methodik und wichtigste Befunde.....	12
2.3	Zusammenhang zwischen Auflösung der Aufmerksamkeit und Verarbeitungskapazität .....	16
2.4	Neuronale Grundlagen der Auflösung der Aufmerksamkeit.....	19
2.4.1	Neuronale Korrelate der selektiven visuellen Aufmerksamkeit .....	19
2.4.2	Neuronale Korrelate der Auflösung der Aufmerksamkeit .....	25
2.5	Synthese und integratives Modell .....	27
2.6	Entwicklung der selektiven visuell-räumlichen Aufmerksamkeit .....	31
2.6.1	Filtern von Informationen .....	31
2.6.2	Ausrichtung der Aufmerksamkeit .....	32
2.6.3	Verfolgen von Objekten .....	34
2.6.4	Fazit.....	34
2.7	Entwicklung der Auflösung der Aufmerksamkeit.....	34
2.8	Entwicklung der Verarbeitungskapazität als Grundlage der Entwicklung der Auflösung der Aufmerksamkeit .....	38
2.8.1	Theoretische Überlegungen zur Entwicklung der Verarbeitungskapazität.....	38
2.8.2	Entwicklung der Verarbeitungskapazität: Empirische Befunde .....	40
2.8.3	Entwicklungsbezogene empirische Befunde zum Zusammenhang von Verarbeitungsressourcen und Präzision der Selektion .....	41
2.9	Neuronale Grundlagen der Entwicklung der Auflösung der Aufmerksamkeit .....	43
2.9.1	Grundlagen der Hirnentwicklung in Kindheit und Jugend .....	44
2.9.2	Neuronale Grundlagen der Entwicklung der Aufmerksamkeit.....	46
2.10	Zusammenfassung .....	48
<b>3</b>	<b>Fragestellung und Hypothesen.....</b>	<b>51</b>
<b>4</b>	<b>Experiment 1: Entwicklung der Auflösung der Aufmerksamkeit .....</b>	<b>57</b>
4.1	Methode .....	57
4.1.1	Operationalisierung und Design.....	57
4.1.2	Statistische Hypothesen .....	66

4.1.3	Versuchspersonen .....	67
4.1.4	Material und Stimuli .....	68
4.1.5	Ablauf.....	71
4.2	Ergebnisse.....	75
4.2.1	Object-Tracking-Experiment .....	75
4.2.2	Lücken-Detektions-Experiment .....	77
4.3	Diskussion .....	81
4.3.1	Vergleich mit verwandten Entwicklungsstudien .....	82
4.3.2	Entwicklung der dynamischen Sehschärfe.....	85
4.3.3	Alternative Erklärungen des Entwicklungsverlaufs – visuelle und motivationale Faktoren.....	86
4.3.4	Einbettung in die Forschung zur Entwicklung der Aufmerksamkeit.....	87
4.3.5	Zugrunde liegende Mechanismen .....	88
4.3.6	Schlussfolgerung .....	89
<b>5</b>	<b>Experiment 2: Einfluss der Verarbeitungskapazität auf die Entwicklung der Auflösung der Aufmerksamkeit .....</b>	<b>90</b>
5.1	Methode .....	90
5.1.1	Operationalisierung und Design.....	90
5.1.2	Statistische Hypothesen .....	98
5.1.3	Versuchspersonen .....	99
5.1.4	Material und Stimuli .....	100
5.1.5	Ablauf.....	102
5.2	Ergebnisse.....	107
5.2.1	MOT-Experiment.....	107
5.2.2	Aufgaben zur Verarbeitungskapazität.....	112
5.2.3	Korrelationen zwischen den Schwellenwerten und den Maßen des Arbeits- und Kurzzeitgedächtnisses .....	113
5.3	Diskussion .....	114
5.3.1	Anstieg des kritischen Abstandes mit zunehmender Zielreizanzahl.....	114
5.3.2	Bezug zu Studien zum visuell-räumlichen Arbeitsgedächtnis.....	117
5.3.3	Entwicklung des Arbeits- und Kurzzeitgedächtnisses .....	119
5.3.4	Altersabhängiger Effekt der Load auf die Auflösung der Aufmerksamkeit .....	120
5.3.5	Vergleiche mit verwandten Studien .....	122
5.3.6	Ursachen der entwicklungsbedingten Zunahme der Verarbeitungskapazität .....	124
5.3.7	Schlussfolgerung .....	125
<b>6</b>	<b>Experiment 3: Neuronale Grundlagen der Entwicklung der Auflösung der Aufmerksamkeit.....</b>	<b>126</b>
6.1	Methode .....	126
6.1.1	Operationalisierung und Design.....	126
6.1.2	Versuchspersonen .....	136
6.1.3	Stimuli und Ablauf.....	137

6.1.4	fMRT-Datengewinnung .....	141
6.1.5	fMRT-Datenauswertung .....	141
6.1.6	Statistische Hypothesen .....	144
6.2	Ergebnisse.....	147
6.2.1	Verhaltensdaten.....	147
6.2.2	FMRT-Daten .....	149
6.3	Diskussion .....	158
6.3.1	Neurokognitive Entwicklung des Trackingnetzwerkes .....	159
6.3.2	Neuronale Grundlagen der Auflösung der Aufmerksamkeit .....	161
6.3.3	Neurokognitive Entwicklung der Auflösung der Aufmerksamkeit .....	163
6.3.4	Schlussfolgerung .....	165
<b>7</b>	<b>Allgemeine Diskussion .....</b>	<b>167</b>
7.1	Integration der Ergebnisse aus Experiment 2 und 3 .....	169
7.2	Rückbezug auf das integrative Modell .....	171
7.3	Bezug zu Lavies Load-Theorie .....	173
7.4	Alternative Erklärungsansätze: Entwicklung der Hemmung .....	175
7.5	Bezug zur Entwicklung und zu Einschränkungen der Lesefähigkeit .....	178
7.6	Schlussfolgerung .....	180
<b>8</b>	<b>Ausblick .....</b>	<b>182</b>
8.1	Charakterisierung des räumlichen Profils des Aufmerksamkeitsfokus bei Kindern..	182
8.2	MOT bei Kindern: seriell oder parallel? .....	184
8.3	Weitergehende Charakterisierung der Entwicklung der Auflösung der Aufmerksamkeit .....	185
8.4	Präzisierung der neurokognitiven Mechanismen der Auflösung der Aufmerksamkeit .....	186
8.5	Neurokognitive Korrelate einer Variation der Anzahl der Objekte bei gleichzeitiger Variation des Abstandes .....	187
	<b>Abstract .....</b>	<b>189</b>
	<b>Literaturverzeichnis.....</b>	<b>191</b>
	<b>Anhang.....</b>	<b>218</b>

# 1 Einleitung

Schaut man sich die Schulbücher der ersten Schuljahre an, so fällt einem auf: Die Bilder werden weniger, der Text wird mehr und die Schrift des Textes wird immer kleiner. Die ersten beiden Punkte sind leicht erklärt. Die Kinder lernen lesen und die Worte ersetzen die Bilder. Doch warum wird zuerst zunächst große Schrift verwendet und deren Größe anschließend immer weiter reduziert? Es ist zu vermuten, dass die Schulbuchautoren hiermit intuitiv auf ein Bedürfnis ihrer (kleinen) Leser reagieren. Doch worin besteht dieses Bedürfnis und worin ist es begründet?

Die Antworten auf diese Fragen stehen möglicherweise im Zusammenhang mit einer Fähigkeit unseres kognitiven Verarbeitungssystems – der *Aufmerksamkeit*. Hierunter versteht man die Fähigkeit, die Wahrnehmung eines Teiles der Informationen aus der Umwelt zu verstärken und die übrigen Informationen zu ignorieren oder zu unterdrücken (z.B. H. Müller & Krummenacher, 2007). Hilfreich zur Verdeutlichung ist in diesem Zusammenhang die Idee von Aufmerksamkeit als einem Scheinwerfer, der sich im Raum umherbewegen und in seiner Größe variieren kann (C. W. Eriksen & Yeh, 1985; Posner, 1980). Gemäß dieser Metapher werden die Informationen im Scheinwerferlicht hervorgehoben, die anderen Informationen werden ignoriert oder unterdrückt. Es gibt jedoch Hinweise darauf, dass die Fähigkeiten des Scheinwerfers in verschiedener Hinsicht begrenzt sind (Cavanagh, 2004). Eine dieser Begrenzungen scheint darin zu bestehen, dass der Scheinwerfer nicht unendlich klein fokussiert werden kann, sondern dass es vielmehr eine minimale Größe des Scheinwerferkegels gibt. Diese minimale Größe des Scheinwerferkegels setzt vermutlich auch der Feinheit der visuellen Details, die man beachten kann, eine Grenze. Hier könnte der Unterschied zwischen Kindern und Erwachsenen liegen, der dazu führt, dass Kinder beim Lesen zunächst größere Buchstaben benötigen: Die Fähigkeit, feine Details zu beachten, könnte bei Kindern noch nicht erwachsenähnlich entwickelt sein und dies könnte bewirken, dass Kinder kleine Buchstaben noch nicht richtig verarbeiten können.

Die minimale Größe des Scheinwerferkegels wird auch als *Auflösung der Aufmerksamkeit* (He & Cavanagh, 1996; He, Cavanagh & Intriligator, 1997; Intriligator & Cavanagh, 2001) bezeichnet. Sie ist bei Erwachsenen gut untersucht, es ist jedoch nicht erforscht, wie sie sich im Laufe der kindlichen Entwicklung verändert. Studien, welche die Entwicklung der Fähigkeit zur Verarbeitung von nahe beieinander platzierten Objekten untersuchen, deuten darauf hin, dass Kinder derartige Stimuluskonfigurationen zunehmend besser verarbeiten können (Bondarko & Semenov, 2005; Enns & Girgus, 1985; Jeon, Hamid, Maurer & Lewis,



2010; Pastò & Burack, 1997; Semenov, Chernova & Bondarko, 2000). Unklar bleibt bei diesen Studien jedoch, ob die beobachteten Veränderungen auf Verbesserungen in der visuellen Wahrnehmung oder auf eine Entwicklung der Fähigkeit zur Ausrichtung der Aufmerksamkeit auf feine Details zurückzuführen sind. Mit der vorliegenden Arbeit soll nun dezidiert die letztere Fähigkeit untersucht werden. Es soll untersucht werden, ob und wie sich die Auflösung der Aufmerksamkeit im Laufe der Kindheit verändert.

Die Arbeit beschränkt sich jedoch nicht die Beschreibung des Entwicklungsverlaufs der Auflösung der Aufmerksamkeit. Sie beschäftigt sich auch mit der sich unmittelbar anschließenden Frage, welche Mechanismen dem Entwicklungsverlauf der Auflösung der Aufmerksamkeit zugrunde liegen. Ein in der kognitiven Entwicklungspsychologie viel diskutierter Faktor, der als genereller Motor der kognitiven Entwicklung vermutet wird, ist die Zunahme der *Verarbeitungsressourcen* (z.B. Halford & Andrews, 2011; Pascual-Leone, 1970). Unter Verarbeitungsressourcen versteht man eine „Menge von etwas“, das erforderlich ist, um kognitive Verarbeitung ausführen zu können (Styles, 2006, S. 7). Derartige Verarbeitungsressourcen scheinen auch benötigt zu werden, um den Scheinwerferkegel eng zusammenzuziehen (z.B. Alvarez & Franconeri, 2007; Howard & Holcombe, 2008), und eine mögliche Erklärung der Entwicklung der Auflösung der Aufmerksamkeit könnte darin bestehen, dass der altersbedingte Zuwachs an Verarbeitungsressourcen es Kindern erlaubt, den Fokus der Aufmerksamkeit zunehmend enger zusammenzuziehen. Das Zutreffen dieser Hypothese soll im Rahmen dieser Arbeit überprüft werden und damit der Frage nachgegangen werden, ob sich die Entwicklung der Auflösung der Aufmerksamkeit mit einer Theorie der kognitiven Entwicklung aufgrund der Zunahme von Verarbeitungsressourcen verknüpfen lässt.

Eine andere mögliche Herangehensweise, um die Grundlagen der Entwicklung der Auflösung der Aufmerksamkeit zu untersuchen, ist eine Betrachtung der entwicklungsbegleitenden Veränderungen auf neuronaler Ebene. Mittels *funktioneller Magnetresonanztomographie* (fMRT) lässt sich beobachten, welche Hirnregionen in welcher Stärke bei kognitiven Aufgaben aktiv sind und ob sich diese Aktivität zwischen Kindern und Erwachsenen unterscheidet. In der vorliegenden Studie soll mit dieser Methode untersucht werden, ob Kinder und Erwachsene Unterschiede in ihrer neuronalen Aktivität aufweisen, wenn sie den Scheinwerferkegel der Aufmerksamkeit enger zusammenzuziehen. Abweichungen der neuronalen Aktivität von Kindern könnten – für sich genommen oder auf kognitive Funktionen hindeutend – Hinweise darauf liefern, wo die Bedingungen der geringeren Auflösung der Aufmerksamkeit von Kindern zu suchen sind. Es wird vermutet (Intriligator

& Cavanagh, 2001; Stevens & Bavelier, 2012), dass das Zusammenziehen des Fokus der Aufmerksamkeit im Zusammenhang mit dem fronto-parietalen Aufmerksamkeitsnetzwerk (Corbetta & Shulman, 2002) steht. Diese Vermutung wurde bisher jedoch selbst bei Erwachsenen nicht empirisch überprüft, sodass letztlich unklar ist, mit welchen neuronalen Korrelaten eine räumlich eng fokussierte Aufmerksamkeitsausrichtung generell einhergeht. Somit leistet die geplante Untersuchung auch einen Beitrag zur prinzipiellen Bestimmung der neuronalen Grundlagen räumlich präziser Aufmerksamkeit. Der Hauptfokus von Experiment 3 liegt jedoch auf der Untersuchung der neuronalen Mechanismen, die der entwicklungsbedingten Veränderung der Auflösung der Aufmerksamkeit zugrunde liegen. Hiermit ergänzt Experiment 3 die in Experiment 2 auf Verhaltensebene gewonnen Befunde und ermöglicht einen umfassenden Blick auf die Bedingungen, die der Entwicklung der Auflösung der Aufmerksamkeit zugrunde liegen.

Im nun folgenden zweiten Kapitel wird der theoretische Rahmen, in den die vorliegende Arbeit eingebettet ist, erläutert, und die wichtigsten Befunde verwandter empirischer Studien werden dargestellt. Dem schließt sich in Kapitel 3 eine Darstellung der Fragestellungen und Hypothesen dieser Untersuchung an. In den Kapiteln 4 bis 6 werden die drei empirischen Studien, die zur Beantwortung der Fragestellungen durchgeführt wurden, erläutert. Kapitel 7 integriert die Ergebnisse dieser Studien und diskutiert die Ergebnisse im Hinblick auf den theoretischen und empirischen Rahmen dieser Arbeit. Kapitel 8 gibt einen Ausblick auf mögliche zukünftige Untersuchungen, die sich aus der vorliegenden Arbeit ergeben.

## **2 Theoretischer und empirischer Hintergrund**

Dieses Kapitel dient der Darstellung des theoretischen bzw. empirischen Hintergrundes, in den die vorliegende Untersuchung eingebettet ist. Begonnen wird mit einer Eingrenzung des für die vorliegende Arbeit relevanten Forschungsbereichs innerhalb der umfassenden Forschung zur Aufmerksamkeit (2.1). Darauf folgt die Erläuterung des für die vorliegende Untersuchung zentralen Konstrukts, der Auflösung der Aufmerksamkeit. In diesem Zusammenhang werden auch die zur Messung der Auflösung der Aufmerksamkeit verwendeten Versuchsanordnungen und die zentralen mit diesen Versuchsanordnungen gewonnenen Ergebnisse dargestellt (2.2). Die beiden darauf folgenden Abschnitte beschäftigen sich mit möglichen der Auflösung der Aufmerksamkeit zugrunde liegenden Mechanismen. Hierbei wird zunächst auf die für Experiment 2 maßgebliche Frage eingegangen, inwieweit sich empirische Belege für einen Zusammenhang zwischen Auflösung der Aufmerksamkeit und Verarbeitungsressourcen finden lassen (2.3). Der darauf folgende Abschnitt beschäftigt sich mit den neuronalen Grundlagen der Auflösung der Aufmerksamkeit (2.4). In Abschnitt 2.5 werden die bis hierhin dargestellten Ideen und Befunde mit Bezug auf die Auflösung der Aufmerksamkeit zusammengefasst und in einem Modell integriert. Die zweite Hälfte des Kapitels greift die Themen der ersten Hälfte unter einer Entwicklungsperspektive wieder auf. Die zentrale Frage ist hierbei, ob es Anhaltspunkte für eine Entwicklung der Auflösung der Aufmerksamkeit in der Kindheit gibt und welche Bedingungen dieser Entwicklung zugrunde liegen könnten. Hierzu wird zunächst als Grundlage der weiteren Darstellung erläutert, wie sich die selektive visuell-räumliche Aufmerksamkeit in Kindheit und Jugend verändert (2.6). Der darauf folgende Abschnitt fasst die Entwicklungsstudien zusammen, die der Beantwortung der Frage, ob und inwieweit sich die Auflösung der Aufmerksamkeit im Kindesalter entwickelt, am nächsten kommen (2.7). Die Abschnitte 2.8 und 2.9 zielen, analog der Darstellung im ersten Teil des Kapitels, auf eine Betrachtung möglicher Grundlagen der Entwicklung der Auflösung der Aufmerksamkeit ab. Hier wird zunächst der Frage nachgegangen, inwieweit sich die verändernde Auflösung der Aufmerksamkeit durch den globalen Entwicklungsmechanismus einer Zunahme der Verarbeitungsressourcen erklären lässt (2.8). Anschließend wird geprüft, ob sich aus dem derzeitigen Forschungsstand zur neuronalen Entwicklung in der Kindheit Anhaltspunkte dafür generieren lassen, warum sich die Auflösung der Aufmerksamkeit entwickelt (2.9). Die abschließende Zusammenfassung (2.10) leitet über zur Fragestellung und den Hypothesen dieser Untersuchung, die im nächsten Kapitel dargestellt werden.

## 2.1 Aufmerksamkeit

Aufmerksamkeit ist ein heterogenes Konstrukt, das auf viele unterschiedliche Fragestellungen, Verarbeitungsebenen und Modalitäten und angewendet wird und dem eine Reihe unterschiedlicher Bedeutungen zugeschrieben wird (z.B. Beck & Kastner, 2009; Chun, Golomb & Turk-Browne, 2011; Styles, 2006). In diesem Abschnitt sollen zwei für die vorliegende Arbeit maßgebliche Ausschnitte der Aufmerksamkeitsforschung, die selektive visuell-räumliche Aufmerksamkeit (2.1.1) und das Konzept von Aufmerksamkeit als Ressource (2.1.2) näher betrachtet werden, bevor abschließend ein Rahmenmodell vorgestellt wird, in dem beide Ausschnitte und deren Beziehung berücksichtigt werden (2.1.3).

### 2.1.1 Selektive visuell-räumliche Aufmerksamkeit

Das menschliche Verarbeitungssystem ist ständig einer Vielzahl von Reizen ausgesetzt. Gleichzeitig weist es starke Begrenzungen in seiner Verarbeitungskapazität auf, die sich, neurophysiologisch betrachtet, aus dem Verhältnis der dem Gehirn zur Verfügung stehenden Energie (Clarke & Sokoloff, 1994) und dem Energieverbrauch eines Neurons bei Aktivität (Attwell & Laughlin, 2001) ergeben. Die Antwort des kognitiven Systems auf diese Diskrepanz besteht in einer flexiblen und aufgabenabhängigen Zuweisung der zur Verfügung stehenden Verarbeitungskapazität zu einem Teil der Informationen. Gemäß einer recht allgemein gehaltenen Definition handelt es sich bei Aufmerksamkeit nun um den Prozess, bei dem die begrenzten Verarbeitungsressourcen zugewiesen werden (Carrasco, 2011). Das Resultat dieses Prozesses ist eine *Selektion* von Informationen, d.h. ein Zustand, in dem ein Teil der vorhandenen Informationen hervorgehoben wird, während der andere Teil vernachlässigt oder sogar unterdrückt wird (z.B. Bisley, 2011). Messbar wird dies durch eine schnellere und fehlerfreiere Verarbeitung beachteter Informationen im Vergleich zu nicht beachteten Informationen (Haberlandt, 1997).

Selektive Aufmerksamkeit kann sich auf eine Vielzahl von Aspekten beziehen. Zunächst einmal kann sie auf verschiedenen Hierarchieebenen des kognitiven Systems zum Tragen kommen (Chun et al., 2011). Sie kann sich sowohl auf die in den Sinnesorganen eintreffenden Informationen beziehen (*perzeptuelle* Aufmerksamkeit; Gottlieb, Balan, Oristaglio & Schneider, 2009) als auch auf Repräsentationen, die bereits intern repräsentiert sind (*exekutive* Aufmerksamkeit; Breckenridge, Atkinson & Braddick, 2012). Im Mittelpunkt der vorliegenden Arbeit steht die *perzeptuelle* Aufmerksamkeit. Diese kann wiederum die Verarbeitung innerhalb verschiedener Modalitäten modulieren. Die vorliegende Arbeit konzentriert sich auf die *visuelle* Aufmerksamkeit, d.h. die Aufmerksamkeit, die eine Modulation der visuellen Wahrnehmung bewirkt (Chun & Wolfe, 2001). Visuelle

Aufmerksamkeit kann auf Orte, Eigenschaften oder Objekte gerichtet sein (z.B. Styles, 2006). Für die vorliegende Untersuchung spielt vorwiegend die *räumliche* visuelle Aufmerksamkeit eine Rolle, d.h. die Aufmerksamkeit, die zu einem Zeitpunkt auf einen bestimmten Ort oder mehrere bestimmte Orte im visuellen Feld gerichtet ist (H. Müller & Krummenacher, 2007). Es hat sich gezeigt, dass die visuell-räumliche Aufmerksamkeit auf verschiedene Weisen zugewendet werden kann. Sie kann erstens entweder *willkürlich (endogen, top-down)*, d.h. auf der Basis interner Ziele und Vorerfahrungen, oder *unwillkürlich (exogen, bottom-up)*, d.h. als Antwort auf saliente externe Reize, zugeteilt werden (H. Müller & Rabbitt, 1989). Zweitens kann sie entweder offen, d.h. begleitet von einer Bewegung der Augen oder des Kopfes, oder verdeckt, d.h. ohne äußerlich sichtbare Bewegungen, zugeteilt werden (Posner, 1980).

Die Zuwendung visuell-räumlicher Aufmerksamkeit resultiert in einer Selektionsregion (Intriligator & Cavanagh, 2001), d.h. einer Region innerhalb des visuellen Feldes, deren Informationen besser oder schneller verarbeitet werden.<sup>1</sup> Verschiedene Forscher haben sich mit der Frage beschäftigt, wie sich diese Selektionsregion genauer charakterisieren lässt. In einem ersten Modell wurde die Selektionsregion mit einem *Lichtkegel (spotlight)* fixer Größe verglichen, der sich im Raum hin und her bewegen kann und der die Verarbeitung der Informationen, die sich in dessen Fokus befinden, verbessert (Posner, 1980). Die grundlegende Idee einer sich im Raum bewegenden Selektionsregion wurde im später formulierten *Gummilinsen-Modell (zoom lens model)*; C. W. Eriksen & Yeh, 1985; LaBerge, 1983) beibehalten. Zusätzlich wird in diesem Modell jedoch angenommen, dass die Größe der Selektionsregion variieren kann. Diese Annahme basiert auf dem Befund, dass die Selektionsregion in Abhängigkeit von der Aufgabenstellung eine große Breite unterschiedlicher Größen annehmen kann (z.B. Downing & Pinker, 1985; C. W. Eriksen & St. James, 1986). Darüber hinaus geht das Gummilinsen-Modell davon aus, dass die Verarbeitungsintensität pro Flächeneinheit davon abhängig ist, wie groß die selektierte Region ist. So wird angenommen, dass bei der Selektion einer kleinen Fläche die dort enthaltenen Informationen mit hoher Intensität verarbeitet werden, während bei der Selektion einer zunehmend großen Fläche die Verarbeitungskraft pro Flächeneinheit abnimmt. Das Gummilinsen-Modell liegt auch der vorliegenden Arbeit zugrunde.

Darüber hinaus hat sich gezeigt, dass die Ausrichtung der selektiven visuell-räumlichen Aufmerksamkeit auch eine dynamische Komponente besitzt, insofern als die Anpassung der Größe der Selektionsregion an die jeweiligen Anforderungen Zeit benötigt (Benso, Turatto,

---

<sup>1</sup> Diese Selektionsregion scheint prinzipiell auch räumlich teilbar zu sein (Awh & Pashler, 2000; Kramer & Hahn, 1995).

Mascetti & Umiltà, 1998; C. W. Eriksen & St. James, 1986). Jonides (1983) hat hierzu ein Zwei-Prozess-Modell der Aufmerksamkeit vorgeschlagen. Er nimmt an, dass bei einer perzeptuellen Aufgabe die Reizkonfiguration zunächst im diffusen Modus wahrgenommen wird, d.h., dass das gesamte visuelle Feld mit der gleichen Menge Aufmerksamkeit belegt ist und die Informationen parallel verarbeitet werden. Danach wird in den fokussierten Modus übergegangen, bei dem die Aufmerksamkeit auf den relevanten Teil des visuellen Feldes konzentriert ist und vorwiegend die Informationen innerhalb der Selektionsregion verarbeitet werden.

### 2.1.2 Aufmerksamkeit als Ressource

Aufmerksamkeit spielt in der vorliegenden Arbeit nicht nur als selektiver Prozess eine Rolle. Ebenfalls ist eine weitere Sichtweise von Bedeutung, nach der Aufmerksamkeit selbst als Ressource aufzufassen ist (vgl. Kahneman, 1973; Styles, 2006). Gemäß dieser Sichtweise ist die Menge der Informationen, die gleichzeitig im Fokus der Aufmerksamkeit gehalten bzw. verarbeitet werden können, begrenzt und wird als *Aufmerksamkeitskapazität* bezeichnet. Der Begriff der *Verarbeitung* wird in diesem Zusammenhang recht weit verwendet und kann verschiedene Anforderungen wie z.B. das Durchführen von Aufgaben bzw. Aufgabenteilen oder das Beachten von perzeptuellen Informationen umfassen (z.B. McLeod, 1977; Pylyshyn & Storm, 1988; Trick & Pylyshyn, 1994). Aufgaben, die zur Messung der Aufmerksamkeitskapazität einer Person herangezogen werden können, sind u.a. das *Multiple-Object-Tracking-Paradigma* (MOT-Paradigma; Pylyshyn & Storm, 1988; vgl. 2.2.2) und *Zählaufgaben* (Jevons, 1871; vgl. Box 1.1, S. 14).

Die Idee einer begrenzten Aufmerksamkeitsressource wurde in einer Gruppe von Modellen formalisiert, die als *Kapazitätsteilungs-Modelle* (*capacity sharing models*) zusammengefasst werden (Kahneman, 1973; Navon & Miller, 2002; Tombu & Jolicoeur, 2003). In diesen Modellen wird davon ausgegangen, dass Aufmerksamkeit begrenzt ist, dass sie jedoch zwischen verschiedenen Aufgaben flexibel verteilt werden kann. Die Aufmerksamkeitsressource, die in diesen Modellen beschrieben wird, wird von einigen der Autoren weiter als „generell“ oder „zentral“ charakterisiert, was bedeutet, dass sie sich auf höhere kognitive Prozesse bezieht und unabhängig von der Modalität des Inputs ist (Johnston, McCann & Remington, 1995; Tombu & Jolicoeur, 2003).

Aufmerksamkeit, verstanden als Ressource, weist enge Verknüpfungen und Überschneidungen mit einem anderen Konstrukt, dem *Arbeitsgedächtnis* (Baddeley & Hitch, 1974), auf. Hierunter versteht man einen Mechanismus, der eine begrenzte Menge Informationen über einen begrenzten Zeitraum in einem zugriffsbereiten Zustand hält, sodass

diese Informationen in kognitiven Aufgaben verwendet werden können (Cowan, 2005). In vielen Definitionen subsumiert dieser Begriff auch die Fähigkeit, gleichzeitig zum Speichern der Informationen dieselben oder andere Informationen zu manipulieren (z.B. Turner & Engle, 1989).<sup>2</sup> Die Verwandtschaft der beiden Konstrukte Arbeitsgedächtnis und Aufmerksamkeit wird im Allgemeinen damit belegt, dass beide die gleiche Menge an Informationen, nämlich vier Einheiten, halten können (Cowan, 2001; Feng, Pratt & Spence, 2012) und dass es große Überschneidungen im Hinblick auf die zugrunde liegenden neuronalen Substrate zu geben scheint (Fusser et al., 2011; Mayer et al., 2007). Aufmerksamkeit und Arbeitsgedächtnis sind jedoch auch funktional in verschiedener Hinsicht eng verknüpft (für Reviews siehe z.B. Awh, Vogel & Oh, 2006; Gazzaley & Nobre, 2012). Für die vorliegende Untersuchung relevant ist vor allem der Vorschlag, dass visuelle Aufmerksamkeit und visuelles Arbeitsgedächtnis auf demselben kapazitätsbegrenzten Mechanismus beruhen und auf denselben Ressourcenpool zurückzugreifen scheinen (Barrouillet, Bernardin, Portrat, Vergauwe & Camos, 2007; Cowan, 2005). So konnte in verschiedenen Studien belegt werden, dass es zu Interferenzen kommt, wenn Aufgaben zu visueller Aufmerksamkeit und visuellem Arbeitsgedächtnis kombiniert werden (z.B. Awh, Jonides & Reuter-Lorenz, 1998; Feng et al., 2012; Oh & Kim, 2004; Woodman & Luck, 2004; siehe aber Fougny & Marois, 2006). In Anlehnung an diese Befunde und Überlegungen können Aufmerksamkeit und Arbeitsgedächtnis unter einem gemeinsamen Begriff, den *Verarbeitungsressourcen*, subsumiert werden (Feng et al., 2012). Die Menge der Verarbeitungsressourcen, die einer Person zu Verfügung stehen, ist deren *Verarbeitungskapazität*. In der vorliegenden Arbeit sollen die Begriffe Verarbeitungsressourcen und Verarbeitungskapazität in dieser umfassenden Bedeutung, die sowohl Aufmerksamkeit als auch Arbeitsgedächtnis umfasst, verwendet werden.

---

<sup>2</sup> In der Verarbeitungskomponente unterscheidet sich das Arbeitsgedächtnis von einem verwandten Konstrukt – dem Kurzzeitgedächtnis – welches ausschließlich die Fähigkeit zur Aufrechterhaltung von Informationen über einen kurzen Zeitraum beschreibt (R. C. Atkinson & Shiffrin, 1968). Aufgrund der zusätzlichen Verarbeitungskomponente des Arbeitsgedächtnisses wird angenommen, dass dieses in stärkerem Ausmaß als das Kurzzeitgedächtnis Aufmerksamkeits- oder exekutive Kontrolle benötigt und somit mehr Verarbeitungsressourcen verbraucht (Asthle & Scerif, 2011; Conway et al., 2005). Deswegen soll in der vorliegenden Arbeit der Begriff „Verarbeitungsressourcen“ nur das Arbeitsgedächtnis, nicht aber das Kurzzeitgedächtnis umfassen. Nichtsdestotrotz ist davon auszugehen, dass es deutliche Überschneidungen zwischen den Konstrukten Arbeitsgedächtnis und Kurzzeitgedächtnis gibt und dass Aufgaben zum Kurzzeitgedächtnis auch Fähigkeiten messen, die in Arbeitsgedächtnisaufgaben getestet werden (Asthle & Scerif, 2011; Cowan et al., 2005). Dies drückt sich – zumindest in der Arbeitsgedächtnisforschung bei Erwachsenen – teilweise auch darin aus, dass die beiden Begriffe teilweise synonym verwendet werden (z.B. Todd & Marois, 2004; Vogel & Machizawa, 2004).

### 2.1.3 Grenzen der visuell-räumlichen Selektion

Aus der bisherigen Darstellung wird deutlich, dass der Begriff der Aufmerksamkeit in vielfacher Hinsicht eng mit dem Begriff der Begrenzung verknüpft ist. So kann Aufmerksamkeit als Antwort auf die Begrenzung von Verarbeitungsressourcen aufgefasst werden und scheint gleichzeitig selbst begrenzt. Cavanagh (2004) hat ein Rahmenmodell zur Architektur der Selektion entwickelt, in dem er die verschiedenen Begrenzungen der Aufmerksamkeit in einem Modell integriert. Hierin postuliert er, dass die visuell-räumliche Aufmerksamkeit durch drei Grenzen charakterisiert ist. Die erste Begrenzung bezieht sich auf die räumliche Ausdehnung der Selektionsregion. So nimmt Cavanagh an, dass die Größe der Selektionsregion nicht unendlich variiert werden kann, sondern dass es eine untere räumliche Grenze der Selektionsregion, die *Genauigkeitsbegrenzung* (*acuity limit*), gibt. Die zweite Begrenzung bezieht sich auf die Menge der Informationen, die mit Aufmerksamkeit verarbeitet werden können. Laut Cavanagh ist diese Menge begrenzt, es liegt also eine *Kapazitätsbegrenzung* (*capacity limit*) der Aufmerksamkeit vor. Diese Begrenzung weist eine große Überschneidung mit dem Konstrukt der Aufmerksamkeitsressource auf, die im letzten Abschnitt thematisiert wurde. Die dritte Begrenzung besteht hinsichtlich der Menge an Informationen, die aus der Selektionsregion extrahiert werden können. Cavanagh nimmt an, dass aus der Selektionsregion lediglich eine einzige Informationseinheit extrahiert werden kann (Nakayama, 1990). Die entsprechende Begrenzung wird als *Kodierungsbegrenzung* (*coding singularity*) bezeichnet. Cavanagh und Kollegen (Cavanagh, 2004; Cavanagh, 2011) nehmen an, dass es sich bei diesen drei Begrenzungen um grundlegende und unveränderliche Eigenschaften des Aufmerksamkeitssystems handelt. Zudem postulieren sie, dass die genannten Grenzen unabhängig voneinander seien (für eine ähnliche Hypothese siehe Cowan, Fristoe, Elliott, Brunner & Sauls, 2006). Im nächsten Abschnitt (2.2) soll die erste von Cavanagh beschriebene Begrenzung, die Genauigkeitsbegrenzung, welche im Mittelpunkt der vorliegenden Arbeit steht, näher erläutert werden. Im Anschluss (2.3) wird der Frage nachgegangen, wie das Genauigkeitslimit mit der zweiten von Cavanagh beschriebenen Begrenzung, der Kapazitätsbegrenzung, in Beziehung steht.

## 2.2 Auflösung der Aufmerksamkeit

Die von Cavanagh (2004) beschriebene Genauigkeitsbegrenzung der Aufmerksamkeit wird auch als *Auflösung der Aufmerksamkeit* (Cavanagh & He, 2011; He & Cavanagh, 1996; He et al., 1997; Intriligator & Cavanagh, 2001) bezeichnet. Sie soll in diesem Abschnitt zunächst definiert und von verwandten Konstrukten abgegrenzt werden (2.2.1). Im Anschluss werden



die wichtigsten Paradigmen und empirischen Befunde hinsichtlich der Auflösung der Aufmerksamkeit dargestellt (2.2.2).

### 2.2.1 Definition

Die Auflösung der Aufmerksamkeit ist definiert als die kleinste Größe, die ein mit Aufmerksamkeit selektierter Ort annehmen kann (Intriligator & Cavanagh, 2001). Dieser Definition zugrunde liegt die Vorstellung einer aktivierenden Selektionsregion, die in ihrer Größe variieren kann und deren kleinstmögliche Einstellung der Auflösung der Aufmerksamkeit entspricht (Cavanagh, 2004; Cavanagh & He, 2011; Intriligator & Cavanagh, 2001).<sup>3</sup> Gemäß einer anderen, im Prinzip äquivalenten, Definition kann die Auflösung der Aufmerksamkeit auch als der kleinste Abstand zwischen Objekten aufgefasst werden, der es noch erlaubt, jedes der Objekte individuell zu selektieren (He et al., 1997). Dieser Abstand wird auch als *kritischer Abstand* bezeichnet.<sup>4</sup> Wird dieser Abstand unterschritten, können die Objekte nicht mehr *individuiert*, d.h. aufgrund räumlicher oder zeitlicher Information einzeln selektiert (Xu, 2009), und somit auch nicht mehr individuell der weiteren Verarbeitung zugänglich gemacht werden. Stattdessen wird vielmehr eine Textur oder ein Muster wahrgenommen (Bouma, 1970; He et al., 1997).

Die Auflösung der Aufmerksamkeit ist eng verwandt mit dem Phänomen des visuellen *Crowding* (Bouma, 1970; Strasburger, 2005). Darunter versteht man die herabgesetzte Fähigkeit zur Identifikation eines Zielreizes, wenn dieser umgeben von Distraktoren dargeboten wird (Whitney & Levi, 2011). Diese Fähigkeit nimmt umso mehr ab, je mehr Distraktoren um den Zielreiz herum gruppiert werden und je geringer der Abstand zwischen Zielreiz und Distraktoren wird (z.B. Leat, Li & Epp, 1999; Miller, 1991). Ursprünglich wurde das Konzept der Auflösung der Aufmerksamkeit als Erklärungsansatz für das Crowding entwickelt (He & Cavanagh, 1996), neuere Untersuchungen deuten jedoch darauf hin, dass

---

<sup>3</sup> Die Auflösung der Aufmerksamkeit bzw. die kleinste Größe der Selektionsregion wird in dieser Arbeit auch als *präzisiert-mögliche Selektion* bezeichnet. Die Studien aus Abschnitt 2.3 legen nahe, dass die kleinste Größe der Selektionsregion davon abhängt, wie viele Objekte gleichzeitig beachtet werden sollen oder wie schnell sich Objekte bewegen (z.B. Holcombe & Chen, 2012; Tombu & Seiffert, 2008). In dieser Arbeit soll auch die kleinstmögliche Größe der Selektionsregion bei einer bestimmten Anzahl von Objekten (die über der Auflösung der Aufmerksamkeit bei *einem* Objekt liegt) als Auflösung der Aufmerksamkeit bezeichnet werden. Einstellungen, bei der der Fokus der Aufmerksamkeit zwar zusammengezogen, aber nicht, gegeben die jeweiligen Randbedingungen wie Anzahl der Objekte, Geschwindigkeit etc., soweit wie möglich zusammengezogen ist, entspricht nicht der Auflösung der Aufmerksamkeit. Dieser Fall kommt in Experiment 3 zum Tragen. Dann wird von einem mehr oder weniger zusammengezogenen Fokus der Aufmerksamkeit oder einer höheren oder geringeren Präzision der Selektion gesprochen.

<sup>4</sup> Der Begriff *kritischer Abstand* stammt ursprünglich aus der Literatur zum Crowding und ist dort definiert als der Abstand, ab dessen Unterschreitung die flankierenden Distraktoren die Identifikation eines Zielreizes behindern (Whitney & Levi, 2011). Der Begriff wurde von Intriligator und Cavanagh (2001), seine inhaltliche Bedeutung beibehaltend, auch auf andere Paradigmen wie das Flankierreiz-Paradigma angewendet. Er soll in dieser allgemeineren Anwendungsweise auch hier verwendet werden.

Crowding auch auf kognitive Mechanismen, die über Aufmerksamkeit hinausgehen, zurückzuführen ist (Levi, 2008; Pelli, Palomares & Majaj, 2004; Whitney & Levi, 2011). An dieser Stelle wird ein wichtiger Unterschied zwischen Crowding und der Auflösung der Aufmerksamkeit deutlich: Während die Auflösung der Aufmerksamkeit die beeinträchtigte räumliche Selektion bzw. *Individuation* von Objekten beschreibt, handelt es sich bei Crowding um eine eingeschränkte *Identifikation* von Objekten, d.h. um ein eingeschränktes Erkennen von deren Eigenschaften (Intriligator & Cavanagh, 2001). Modelle, die die beiden Prozesse in Beziehung setzen, nehmen an, dass erfolgreiche Individuation die Voraussetzung für erfolgreiche Identifikation ist (Monosov, Sheinberg & Thompson, 2010; Pylyshyn, 2007; Xu, 2009; für eine verwandte Sichtweise in der Säuglingsforschung siehe Leslie, Xu, Tremoulet & Scholl, 1998).

Die Auflösung der Aufmerksamkeit ist auch abzugrenzen von der *Sehschärfe* bzw. dem *Visus*. Diese ist definiert als der kleinste Abstand zwischen zwei Punkten oder Linien, bei dem diese beiden Objekte gerade noch als getrennt wahrgenommen werden können (Riggs, 1966). Die Auflösung der Aufmerksamkeit ist hingegen der kleinste Abstand zwischen zwei Objekten, der es dem Beobachter noch erlaubt, jedes einzelne der Objekte mit Aufmerksamkeit zu belegen. Der Unterschied lässt sich anhand einer typischen Operationalisierung der Sehschärfe weiter verdeutlichen. Dort werden zur Messung der Sehschärfe häufig Streifenmuster mit maximalem Kontrast dargeboten und der Abstand zwischen den Streifen variiert (*grating acuity*; z.B. Skoczenski & Norcia, 2002). Sehschärfe ist nun der minimale Abstand zwischen den Streifen, bei dem der Beobachter die Streifen gerade noch als getrennt (anstatt als homogene Fläche) wahrnehmen kann, die Auflösung der Aufmerksamkeit ist der minimale Abstand zwischen den Balken, bei dem der Beobachter jeden einzelnen Streifen mit Aufmerksamkeit belegen und damit einzeln der weiteren Verarbeitung zugänglich machen kann (vgl. Intriligator & Cavanagh, 2001). Abbildung 2.1 verdeutlicht diesen Unterschied. Wie in 2.2.2 erläutert wird, liegt der kritische Abstand für die Auflösung der Aufmerksamkeit deutlich über dem kritischen Abstand für die Sehschärfe.

Schließlich ist die Auflösung der Aufmerksamkeit abzugrenzen von der *dynamischen Sehschärfe* (*dynamic visual acuity*; Ludvigh, 1948). Diese ist definiert als die Fähigkeit, Details in einem bewegten Objekt zu erkennen (Hoffman, Rouse & Ryan, 1981) und wird typischerweise ermittelt, indem Landolt-Ringe in unterschiedlicher Größe und Geschwindigkeit präsentiert werden. Die kleinste Größe der Lücke im Landolt-Ring, bei der die Probanden den Ort der Lücke noch erkennen können, entspricht der dynamischen Sehschärfe (Ludvigh, 1948; Ludvigh & Miller, 1958). Es ist davon auszugehen, dass die

dynamische Sehschärfe eine Voraussetzung der Auflösung der Aufmerksamkeit ist, sich jedoch von ihr unterscheidet (Intriligator & Cavanagh, 2001).



Abbildung 2.1: Unterschied zwischen Sehschärfe und Auflösung der Aufmerksamkeit. Fixiert man das Kreuz auf der linken Seite, können die Balken auf der rechten leicht gesehen werden. Es ist jedoch schwierig, einen der Balken einzeln zu beachten oder die Balken zu zählen (nach Intriligator & Cavanagh, 2001).

### 2.2.2 Experimentelle Methodik und wichtigste Befunde

Die Auflösung der Aufmerksamkeit wurde bisher vorwiegend mit dem Object-Tracking-Paradigma (Pylyshyn & Storm, 1988) und der Attentional-Walk-Aufgabe (Intriligator & Cavanagh, 2001) untersucht. Beim *Object-Tracking-Paradigma* hat der Proband die Aufgabe, eines oder mehrere dynamische Objekte (im Falle mehrerer Objekte spricht man vom *Multiple-Object-Tracking-Paradigma*; vgl. 2.1.2) über einen Zeitraum von einigen Sekunden mit Aufmerksamkeit zu verfolgen (zu *tracken*). Hierzu wird dem Probanden ein Display mit mehreren identisch aussehenden Punkten dargeboten. Zu Beginn des Durchgangs werden einer oder mehrere der Punkte als Zielreize markiert, die übrigen Punkte dienen als Distraktoren. In der sich nun anschließenden *Trackingphase* bewegen sich die Punkte für mehrere Sekunden zufällig durcheinander. Anschließend bleiben die Punkte stehen und der Proband hat die Aufgabe anzugeben, bei welchen der Punkte es sich um die Zielreize handelt. Um die Auflösung der Aufmerksamkeit zu ermitteln, variierten Intriligator und Cavanagh (2001) den Abstand zwischen dem Zielreiz und den Distraktoren während der Trackingphase.<sup>5</sup> Dieser Operationalisierung zugrunde liegt die Idee, dass ein Zielreiz und ein Distraktor solange erfolgreich auseinandergehalten werden können, solange ihre Distanz nicht den kritischen Abstand unterschreitet, und sie somit nicht in denselben Selektionsbereich fallen.

Bei der *Attentional-Walk-Aufgabe* (Intriligator & Cavanagh, 2001; C. M. Moore, Lanagan-Leitzel, Chen, Halterman & Fine, 2007; C. M. Moore, Lanagan-Leitzel & Fine, 2008) sieht

---

<sup>5</sup> Cavanagh und Intriligator (2001) variierten den Abstand zwischen Zielreiz und Distraktoren, indem sie den Abstand zwischen Bildschirm und Versuchsperson veränderten. Bei dieser Vorgehensweise verändern sich auch die Größe der Reize und die Geschwindigkeit, mit der sich die Reize über den Bildschirm bewegen.

der Proband eine statische Anordnung von identischen Punkten, die in einem Halbkreis um einen Fixationspunkt herum angeordnet sind. Die Anordnung kann bezüglich der Dichte der Punkte und der Exzentrizität des Kreises variieren. Zu Beginn eines Durchgangs wird einer der Punkte markiert und der Proband dadurch angehalten, seine Aufmerksamkeit (verdeckt) auf diesen Punkt zu lenken. Anschließend erhält er eine Reihe von meist fünf bis sieben Anweisungen, die ihn dazu auffordern, seine Aufmerksamkeit nach rechts oder nach links zum jeweils benachbarten Punkt zu bewegen. Nach dem Ende der Anweisungen wird einer der Punkte markiert und der Proband soll angeben, ob es sich dabei um den Punkt handelt, an dem auch er am Ende seiner Schrittsequenz angelangt ist. Hinter diesem Versuchsaufbau steht der Gedanke, dass die Aufmerksamkeit nur dann verlässlich von einem Punkt zum nächsten bewegt werden kann, wenn die Punkte so weit voneinander entfernt sind, dass sie einzeln selektiert werden können.

Mithilfe der beiden eben beschriebenen Versuchsanordnungen ermittelten Intriligator und Cavanagh (2001) einen der Auflösung der Aufmerksamkeit entsprechenden kritischen Abstand von 2.6 bis 6 Winkelminuten für die Fovea. Hierbei war die Auflösung der Aufmerksamkeit im unteren visuellen Feld feiner als im oberen visuellen Feld und bei radial dargebotenen Stimuli feiner als bei tangential dargebotenen Stimuli. Darüber hinaus zeigten sie, dass der kritische Abstand in der Peripherie stark zunimmt: Er verdoppelt sich mit jedem Drittel Sehwinkel, den die Stimuli weiter entfernt von der Fovea dargeboten werden. Hieraus ergibt sich, dass innerhalb der zentralen 30° des visuellen Feldes höchstens ca. 60 Objekte in konzentrischen Kreisen so angeordnet werden könnten, dass sie weiterhin einzeln mit Aufmerksamkeit selektiert werden könnten.

Die von Intriligator und Cavanagh (2001) für die Fovea ermittelten Werte stimmen gut mit den Werten anderer Studien überein, die versucht haben, die untere räumliche Grenze des Selektionsbereichs mit anderen methodischen Zugängen zu messen (Toet & Levi, 1992) (Kowler & Steinman, 1977; Landolt, 1891; Nakayama & Mackeben, 1989). Diese Übereinstimmung zwischen den Ergebnissen zeigt, dass es sich bei den von Intriligator und Cavanagh ermittelten Werten um reliable Maße der unteren räumlichen Grenze der Selektion handelt. Neuere Untersuchungen von Moore und Kollegen (C. M. Moore et al., 2007; C. M. Moore et al., 2008) deuten jedoch gleichzeitig darauf hin, dass, zumindest in der Peripherie, bestimmte Manipulationen – wie die zusätzliche Darbietung von Hinweisreizen oder das Unterscheidbarmachen der Punkte durch Eigenschaften wie Farbe – eine feinere Auflösung der Aufmerksamkeit erlauben als sie von Intriligator und Cavanagh quantifiziert wurde. Die

Werte von Intriligator und Cavanagh könnten somit, zumindest für die Peripherie, eine zu niedrige Schätzung der Auflösung der Aufmerksamkeit darstellen.

In einem Kontrollexperiment konnten Intriligator und Cavanagh (2001) zudem zeigen, dass sich die Auflösung der Aufmerksamkeit deutlich von der Sehschärfe unterscheidet. In der Fovea ist die Auflösung der Aufmerksamkeit mit 3 bis 6 Winkelminuten drei- bis sechsmal größer als die Sehschärfe, die dort eine Winkelminute oder weniger beträgt. Diese Diskrepanz steigt mit zunehmender Exzentrizität stark an.

#### Box 1.1: Weitere experimentelle Paradigmen

**Räumliches Hinweisreiz-Paradigma** (*spatial cueing paradigm*; Posner, 1980; Posner, Nissen & Ogden, 1978). Beim räumlichen Hinweisreiz-Paradigma werden den Probanden zwei Kästchen präsentiert, die rechts und links von einem Fixationskreuz angeordnet sind. In diesen beiden Kästchen erscheinen in den einzelnen Durchgängen Zielreize, auf welche die Probanden schnellstmöglich mit einem Tastendruck reagieren sollen. Den Zielreizen geht in jedem Durchgang ein ortsbezogener Hinweisreiz voraus. Erscheint der Zielreiz in dem vom Hinweisreiz vorhergesagten Kästchen, so nennt man den Durchgang *valide*, erscheint der Zielreiz im nicht vorhergesagten Kästchen, ist der Durchgang *unvalide*. Bei den Hinweisreizen handelt es sich entweder um Symbole (z.B. Pfeile), die meist in der Nähe des Fixationskreuzes dargeboten werden und durch ihre Gestalt einen Ort vorhersagen (zentrale, endogene Hinweisreize) oder um kurzzeitige Veränderungen – z.B. der Helligkeit oder Farbe – der seitlichen Kästchen (periphere, exogene Hinweisreize). Mit dem räumlichen Hinweisreizparadigma wird die Ausrichtung der Aufmerksamkeit (*orienting*; Posner, 1980) im Raum untersucht. Genauer können dabei die drei hypothetischen Komponenten der Ausrichtung (Posner & Petersen, 1990) – die Ablösung vom alten Ort der Aufmerksamkeitsausrichtung (*disengagement*) die Bewegung hin zum neuen Ort (*move*), und die Anbindung an diesen Ort (*engagement*) – untersucht werden. Es wird angenommen, dass mit zentralen Hinweisreizen die willentliche Ausrichtung der Aufmerksamkeit und mit peripheren Hinweisreizen die unwillkürliche Ausrichtung der Aufmerksamkeit untersucht wird (H. Müller & Rabbitt, 1989).

**Flankierreiz-Paradigma** (*flanker task*; B. A. Eriksen & Eriksen, 1974). Bei der Flankierreiz-Aufgabe sieht der Proband einen (meist zentralen) Zielreiz, der von einem oder mehreren Distraktoren flankiert wird. Auf den Zielreiz soll je nach Ausprägung des Reizes mit einer von mehreren Antwortalternativen reagiert werden. In *kongruenten* Durchgängen sind die dargebotenen Distraktoren mit derselben Reaktion wie der Zielreiz verknüpft, in *inkongruenten* Durchgängen verlangen die Distraktoren eine andere Antwort als der Zielreiz.

Im Allgemeinen wird die Reaktionszeit bzw. -genauigkeit kongruenter Durchgänge mit der Reaktionszeit inkongruenter Durchgänge verglichen und meist wird in kongruenten Durchgängen schneller und korrekter reagiert. Diese Differenz wird auch als Flankierreiz-Effekt bezeichnet. Das Flankierreiz-Paradigma wird je nach theoretischer Einbettung der Aufgabe verwendet, um entweder die Fähigkeit zum Filtern, d.h. zum Verarbeiten relevanter und Ignorieren nicht relevanter Informationen, oder die Auswirkungen kognitiver bzw. motorischer Interferenzen zu untersuchen. Es wird somit zur Untersuchung sowohl von Aufmerksamkeits- (im Sinne von Filter-) als auch von Kontrollprozessen herangezogen.

Lavie und Kollegen (z.B. Lavie, 1995; Lavie, Hirst, de Fockert & Viding, 2004) verwenden eine Variation des Flankierreiz-Paradigmas, in dem die Anzahl der den Zielreiz flankierenden Distraktoren variiert wird. Die Anzahl der Distraktoren wird auch als *perzeptuelle Load* bezeichnet. Es wird die Ausprägung des Flankierreiz-Effekts in Abhängigkeit von der Load betrachtet.

**Crowding-Paradigma** (Bouma, 1970). Im Crowding-Paradigma wird dem Probanden ein zentraler Reiz, umgeben von Distraktoren, dargeboten. Dabei wird der Abstand zwischen zentralem Reiz und Distraktoren variiert. Der Proband hat die Aufgabe, Eigenschaften des zentralen Reizes zu erkennen. Das Paradigma zielt darauf ab, die Verarbeitung räumlich eng positionierter Objekte zu untersuchen.

**Visuelle Suche** (*visual search*; Treisman & Gelade, 1980). In der Aufgabe zur visuellen Suche sucht der Proband nach einem Zielreiz innerhalb einer variierenden Anzahl von Distraktoren. Der Zielreiz wird nur in einem Teil der Durchgänge präsentiert und die Aufgabe des Probanden ist es, möglichst schnell anzugeben, ob das Item vorhanden ist oder nicht. Unterscheiden sich die Distraktoren nur in einer Eigenschaft vom Zielreiz, spricht man von *paralleler Suche*, unterscheiden sie sich in einer Verknüpfung von Eigenschaften, spricht man von *serieller Suche*. Zur Untersuchung endogener Aufmerksamkeit wird vorwiegend die serielle Suche verwendet. Es wird hier angenommen, dass diese Aufgabe die Fähigkeit abbildet, den Aufmerksamkeitsfokus effizient durch das visuelle Feld zu bewegen. Die serielle Suchaufgabe hat jedoch zusätzlich eine Filterkomponente, denn neben der reinen Ausrichtung der Aufmerksamkeit geht es hier darum, die Menge der Informationen, die der höheren Verarbeitung zugänglich gemacht werden, zu einem Zeitpunkt zu begrenzen, indem das Objekt im Fokus verarbeitet und alle anderen Objekte gleichzeitig ausgeblendet werden (Posner, Rueda & Kanske, 2007).

**Zählaufgabe** (*enumeration task*; Jevons, 1871). In Zählaufgaben wird den Probanden eine variierende Anzahl von Punkten präsentiert, die beispielsweise zufällig (Chi & Klahr, 1975)

oder in Reihen (Svenson & Sjöberg, 1978) angeordnet werden. Die Probanden haben die Aufgabe, möglichst schnell die Anzahl der Punkte anzugeben. Es werden zwei Prozesse unterschieden, die in Abhängigkeit davon auftreten, wie viele Objekte gezählt werden müssen (Trick & Pylyshyn, 1994): Unter *Subitizing* versteht man das schnelle und genaue „Erfassen“ einer kleinen Menge Objekte, während *Enumeration* das serielle Zählen einer größeren Menge von Objekten beschreibt (E. L. Kaufman & Lord, 1949). Die Anzahl an Objekten, bei der Subitizing in Enumeration übergeht, wird als *Subitizing-Spanne* bezeichnet (Watson, Maylor, Allen & Bruce, 2007). Da angenommen wird, dass beim Subitizing Aufmerksamkeit nötig ist, die zwischen den Objekten verteilt werden muss, kann die Subitizing-Spanne als Maß der Aufmerksamkeitskapazität aufgefasst werden (Burr, Turi & Anobile, 2010).

**Doppelaufgaben-Paradigmen** (*dual task paradigms*; z.B. McLeod, 1977). Bei Doppelaufgaben werden der Versuchsperson zwei verschiedene Aufgaben dargeboten, die sie gleichzeitig erfüllen soll. Die Aufgaben können sich hierbei in Bezug auf ihre Ähnlichkeit (z.B. Allport, Antonis & Reynolds, 1972) oder die relative Aufgabenschwierigkeit (z.B. Kahneman, 1973) unterscheiden. Untersucht wird das Ausmaß der Interferenz zwischen den beiden Aufgaben.

## 2.3 Zusammenhang zwischen Auflösung der Aufmerksamkeit und Verarbeitungskapazität

Cavanagh (2004) geht in seinem Rahmenmodell zur Architektur der Selektion (vgl. 2.1.3) davon aus, dass die Genauigkeitsbegrenzung (die Auflösung der Aufmerksamkeit) und die Kapazitätsbegrenzung der Aufmerksamkeit unabhängig voneinander sind. Diese Annahme basiert auf dem empirischen Befund, dass die Auflösung der Aufmerksamkeit den gleichen Wert aufweist, unabhängig davon, ob eines oder mehrere Objekte zu verfolgen sind (Intriligator & Cavanagh, 2001). Übersetzt in die Terminologie von Norman und Bobrow (1975) nimmt Cavanagh also an, dass es sich bei der Auflösung der Aufmerksamkeit um einen *daten-limitierten* Mechanismus handelt, also einen Mechanismus, der dadurch gekennzeichnet ist, dass auch die Zuwendung weiterer Ressourcen keine Verbesserung der Leistung bewirkt.

Eine Reihe späterer Untersuchungen mit dem MOT-Paradigma deutet jedoch darauf hin, dass es sich bei der Auflösung der Aufmerksamkeit durchaus um einen *ressourcen-limitierten* Mechanismus (Norman & Bobrow, 1975) handelt, dass also die Zuwendung von mehr oder weniger Ressourcen einen Einfluss auf die Auflösung der Aufmerksamkeit hat. So zeigten Howard und Holcombe (2008) und Shim, Alvarez und Jiang (2008), dass bei zunehmender

Zielreizanzahl die Genauigkeit der Selektion während des Trackens abnimmt. In der Untersuchung von Howard und Holcombe verfolgten die Probanden eine variable Anzahl von Objekten. Am Ende des Durchgangs verschwanden die Objekte und die Probanden sollten angeben, wo auf dem Bildschirm ein bestimmter Zielreiz sich zuletzt befunden hatte. Es zeigte sich, dass die Lokalisation des Zielreizortes umso ungenauer war, je mehr Objekte zu verfolgen gewesen waren. Die Autoren interpretieren das Ergebnis dahingehend, dass bei zunehmender Anzahl zu verfolgender Objekte die Menge an Verarbeitungsressourcen, die jedem einzelnen Objekt zugeteilt werden können, abnimmt, und daher nur noch eine zunehmend ungenauere Verarbeitung der einzelnen Objekte möglich ist. Diese Interpretation wird durch eine Reihe von Studien gestützt, die zeigen, dass das Verfolgen von Objekten, die sich sehr nahe kommen können, eine große Menge von Ressourcen verbraucht (Alvarez & Franconeri, 2007; Bettencourt & Somers, 2009; Iordanescu, Grabowecky & Suzuki, 2009; Tombu & Seiffert, 2008, 2010). Tombu und Seiffert (2008) gaben den Probanden parallel zum Verfolgen der Objekte eine Zweitaufgabe (Tondiskrimination) vor. Zudem wies jeder Durchgang ihres Experiments eine kurze Phase auf, in der die Objekte beschleunigten und sich „anzogen“. Fand diese Phase gleichzeitig mit der Zweitaufgabe statt, war sowohl die Leistung in der Tondiskriminationsaufgabe als auch in der Object-Tracking-Aufgabe schlechter, als wenn die Anziehungsphase vor oder nach der Zweitaufgabe stattfand. Die Autoren schließen daraus, dass die Selektion räumlich dichter Objekte erhöhte Anforderungen an die Aufmerksamkeitsressourcen stellt und dadurch eine Interferenz mit der Zweitaufgabe entsteht, wenn beide gleichzeitig auszuführen sind. Ähnliches zeigen Experimente, in denen zusätzlich zum minimalen Abstand zwischen den Objekten auch die Geschwindigkeit der zu verfolgenden Objekte erhöht wurde (Alvarez & Franconeri, 2007; Tombu & Seiffert, 2008, 2010), eine Manipulation, von der gezeigt wurde, dass sie zu einem erhöhten Verbrauch von Verarbeitungsressourcen führt (Holcombe & Chen, 2012). Die Zunahme der Nähe verschärfte den Effekt der Geschwindigkeit auf die Trackingleistung, was darauf hindeutet, dass beide auf dieselben Ressourcen zurückgreifen. Schließlich variierten Iordanescu, Grabowecky und Suzuki (2009) in einer Lokalisierungsaufgabe ähnlich der von Howard und Holcombe die Distanz der zu verfolgenden Objekte zu dem Zeitpunkt, als die Objekte vom Bildschirm verschwanden. Es zeigte sich, dass mit zunehmender Nähe zwischen den Objekten die Lokalisierungsfehler geringer wurden. Die Autoren schließen daraus, dass zu den Zeitpunkten, in denen die Objekte sehr nahe beieinander standen, der Selektion der Zielreize mehr Ressourcen zugeteilt wurden und deswegen eine genauere Lokalisation möglich war. In der Summe deuten diese Studien darauf hin, dass die zunehmend (räumlich) präzise Selektion



von Objekten zu einem Anstieg des Ressourcenverbrauchs führt. Dabei kommen die Autoren der verschiedenen Studien einhellig zu dem Schluss, dass es sich bei der dafür verwendeten Ressource um eine *flexible* Ressource (Alvarez & Franconeri, 2007) handelt, die zwischen den verschiedenen Objekten und Aufgabenanforderungen geteilt werden kann. Diese als *Theorie der flexiblen Ressourcen* bezeichnete Sichtweise hat große Überschneidungen mit den oben genannten Kapazitätsteilungs-Modellen (Kahneman, 1973; Navon & Miller, 2002; Tombu & Jolicoeur, 2003), die allgemein, d.h. nicht nur auf das Tracken bezogen, von einer flexiblen Verteilung der Aufmerksamkeitsressourcen ausgehen.

Dass das Zusammenziehen des Fokus der Aufmerksamkeit Verarbeitungskapazität verbraucht, zeigt auch eine Reihe von Studien, die einen Bezug zwischen dem Arbeitsgedächtnis (Baddeley & Hitch, 1974) und der räumlichen Verteilung visueller Aufmerksamkeit herstellen. Lavie und Kollegen (z.B. Lavie et al., 2004) und Caparos und Linnell (Caparos & Linnell, 2010; Linnell & Caparos, 2011) demonstrierten mit dem Flankierreiz-Paradigma (vgl. Box 1.1), dass eine hohe Arbeitsgedächtnislastung zu einer Vergrößerung des Fokus der Aufmerksamkeit führt. Dieses Ergebnis bestätigen Ahmed und de Fockert (2012) und zeigen darüber hinaus mit einem differentialpsychologischen Zugang, dass Personen mit niedriger Arbeitsgedächtniskapazität nicht in der Lage sind, den Fokus der Aufmerksamkeit räumlich so eng zusammenzuziehen wie Personen mit hoher Arbeitsgedächtniskapazität. Sie zeigen zudem, dass hohe Arbeitsgedächtnislastung und niedrige Arbeitsgedächtniskapazität in ähnlicher Weise wirken und sich addieren. Zusätzlich zu diesen Befunden, die zeigen, dass die zur Verfügung stehende Arbeitsgedächtniskapazität die räumliche Ausdehnung der Selektionsregion beeinflusst, deuten zwei Studien darauf hin, dass die Menge der vorhandenen Arbeitsgedächtnisressourcen auch zeitliche Aspekte der räumlichen Selektion beeinflussen kann. So können Personen mit hoher Arbeitsgedächtnisspanne den Fokus der räumlichen Aufmerksamkeit schneller zusammenziehen (Heitz & Engle, 2007) und diesen engen Fokus länger aufrechterhalten (Poole & Kane, 2009) als Personen mit niedriger Arbeitsgedächtnisspanne.

Zusammengenommen weisen also eine Reihe von Studien darauf hin, dass das Zusammenziehen des Fokus der Aufmerksamkeit zu einem erhöhten Verbrauch von Verarbeitungsressourcen, seien es Aufmerksamkeitsressourcen oder Arbeitsgedächtnisressourcen, führt. Daraus lässt sich folgern, dass die präzisest-mögliche Selektion, also eine Selektion im Bereich der Auflösung der Aufmerksamkeit, in hohem Maße Verarbeitungsressourcen verbraucht.

## 2.4 Neuronale Grundlagen der Auflösung der Aufmerksamkeit

In diesem Abschnitt soll der Frage nachgegangen werden, welche neuronalen Mechanismen der Auflösung der Aufmerksamkeit zugrunde liegen. Dieser Fragestellung soll sich in zwei Schritten genähert werden. Zunächst wird der aktuelle Wissensstand hinsichtlich der neuronalen Grundlagen der selektiven visuellen Aufmerksamkeit im Allgemeinen dargestellt (2.4.1), dann wird der Frage nachgegangen, welche neuronalen Mechanismen möglicherweise der Auflösung der Aufmerksamkeit zugrunde liegen (2.4.2).

### 2.4.1 Neuronale Korrelate der selektiven visuellen Aufmerksamkeit

In der Forschung zu den neurophysiologischen Grundlagen von (willkürlicher) selektiver visueller Aufmerksamkeit werden im Allgemeinen zwei unterschiedliche Aspekte betrachtet (Bisley, 2011; Corbetta & Shulman, 2002; T. Moore, 2006; Noudoost, Chang, Steinmetz & Moore, 2010; Yantis, 2008). Der erste Aspekt sind die *Effekte* von Aufmerksamkeit, also die durch Aufmerksamkeitszuwendung veränderte Verarbeitung sensorischer Informationen in visuellen Arealen. Der zweite Aspekt sind die *Quellen* von Aufmerksamkeit, also die neuronalen Mechanismen, welche die Modulation der sensorischen Areale bewirken. Die Effekte und Quellen von Aufmerksamkeit schlagen sich in unterschiedlichen neuronalen Korrelaten nieder, die im Folgenden, zuerst für die Effekte, dann für die Quellen der Aufmerksamkeit, erläutert werden sollen.

Vorab sei angemerkt, dass sowohl die Forschung zu den Effekten als auch zu den Quellen der selektiven visuellen Aufmerksamkeit vorwiegend auf dem *Biased-Competition-Modell* von Desimone und Duncan (1995) basiert. In diesem neurophysiologischen Ansatz wird angenommen, dass Stimuli, die im visuellen Feld dargeboten werden, um Verarbeitungsressourcen, d.h. um eine Repräsentation auf neuronaler Ebene, konkurrieren. Hierbei wird vermutet, dass die Ressource, um welche die Reize wettstreiten, die rezeptiven Felder der repräsentierenden Neurone sind. Unter einem *rezeptiven Feld* versteht man den Bereich des visuellen Feldes, innerhalb dessen die Darbietung eines Stimulus eine Antwort in dem betreffenden Neuron hervorruft (Kuffler, 1953). Dieser Wettstreit kann durch Eigenschaften (genauer die Salienz) des dargebotenen Reizes (bottom-up) oder durch Signale aus höhergelegenen kognitiven Verarbeitungszentren (top-down) zugunsten des Reizes beeinflusst (*gebiased*) werden. Ein Top-Down-Biassignal zugunsten eines Reizes ist umso wahrscheinlicher, je bedeutsamer eine Eigenschaft des Reizes (Ort, Farbe etc.) für die aktuellen Ziele des Individuums ist. Es wird vermutet, dass die abstrakte Repräsentation des aktuellen Ziels im Arbeitsgedächtnis gespeichert wird (Desimone & Duncan, 1995).

### ***Effekte der Aufmerksamkeitszuwendung***

Unter den Effekten von visueller selektiver Aufmerksamkeit wird im Allgemeinen das veränderte Antwortverhalten von Neuronen visueller Areale infolge modulierender Signale aus höheren visuellen Arealen verstanden (Yantis, 2008). In Studien mit fMRT bei Menschen wurden zwei Prinzipien gefunden, wie die Ausrichtung der Aufmerksamkeit auf einen bestimmten Ort die Antworteigenschaften der korrespondierenden Neurone verändert (Beck & Kastner, 2009). Erstens konnte gezeigt werden, dass Aufmerksamkeit zu einer Erhöhung der *Baseline-Aktivität* (hier: neuronaler Aktivität ohne visuelle Stimulation; Beck & Kastner, 2009) in eng umgrenzten visuellen Regionen führt, wenn auf einen Hinweisreiz hin ein Zielreiz an der korrespondierenden Stelle im visuellen Feld erwartet wird (z.B. Hopfinger, Buonocore & Mangun, 2000; Kastner, Pinsk, De Weerd, Desimone & Ungerleider, 1999; N. G. Müller, Bartelt, Donner, Villringer & Brandt, 2003). Diese Erhöhung der Baseline-Aktivität geht mit einer herabgesetzten Baseline-Aktivität in den Bereichen des visuellen Kortex einher, die das übrige visuelle Feld repräsentieren (Singh, Smith & Greenlee, 2000).<sup>6</sup> Zweitens wurde gezeigt, dass die neuronale Antwort visueller Areale erhöht ist, wenn Aufmerksamkeit auf den korrespondierenden Ort im visuellen Feld gelenkt wird (z.B. Brefczynski & DeYoe, 1999; Somers, Dale, Seiffert & Tootell, 1999; Tootell et al., 1998). Gleichzeitig ist die Aktivität visueller Areale im Vergleich zur Ruheaktivität herabgesetzt, wenn die Aufmerksamkeit auf einen Ort außerhalb des rezeptiven Feldes der betreffenden Region gelenkt wird (Slotnick, Schwarzbach & Yantis, 2003; Somers et al., 1999; Tootell et al., 1998). Dieses Zusammenspiel von erhöhter und herabgesetzter Aktivität stellt vermutlich die neuronale Entsprechung des Filtermechanismus der Aufmerksamkeit dar (Treue, 2012) und zeigt sich in allen Ebenen entlang der visuellen Verarbeitungshierarchie (z.B. Kastner et al., 1999).

Mithilfe von Einzelzellaufzeichnungen wurden auf zellulärer Ebene verschiedene Mechanismen aufgedeckt, die der mit fMRT gefundenen Signalverstärkung zugrunde liegen könnten. Zu den am besten untersuchten Mechanismen gehören die Effekte von Aufmerksamkeit auf die Entladungsrate von Neuronen in visuellen Arealen. So wurde in einer Reihe von Untersuchungen gezeigt, dass ein Neuron eine höhere Entladungsrate zeigt, wenn die Aufmerksamkeit auf einen Stimulus innerhalb seines rezeptiven Feldes gerichtet ist, verglichen damit, wenn ein Stimulus außerhalb des rezeptiven Feldes des Neurons beachtet wird. Dieses typische Ergebnis konnte für die primäre visuelle Sehrinde (V1) und die

---

<sup>6</sup> Für eine Diskussion, ob es sich bei erhöhter Aktivität während der Stimuluspräsentation und der vorbereitenden Aktivität um denselben, additiv wirkenden Mechanismus oder zwei unabhängige Mechanismen handelt siehe Sylvester, Shulman, Jack & Corbetta (2009) und McMains, Fehd, Emmanouil & Kastner (2007).

extrastriären Areale V2, V4 und das medio-temporale Areal (MT) demonstriert werden (z.B. Herrero et al., 2008; McAdams & Maunsell, 1999; Motter, 1993; Treue & Martinez-Trujillo, 1999). Es wird angenommen, dass die Eigenschaft, die das jeweilige Neuron repräsentiert, dadurch verstärkt wahrgenommen wird, sodass der Effekt von Aufmerksamkeit auf die Verarbeitung eines Reizes mit einer Helligkeits- oder Kontraststeigerung des visuellen Reizes verglichen werden kann (Treue, 2012).

Die Effekte von Aufmerksamkeit auf die Entladungsraten einzelner Neurone sind noch stärker und konsistenter, wenn zwei Stimuli innerhalb des rezeptiven Feldes eines Neurons platziert werden (Bisley, 2011; Treue, 2012). Hierbei wird typischerweise ein von dem Neuron bevorzugter Stimulus und ein nicht bevorzugter Stimulus dargeboten (Moran & Desimone, 1985). Wird die Aufmerksamkeit auf einen der Stimuli gelenkt, ähnelt die neuronale Antwort der Nervenzelle der Aktivität, die das Neuron typischerweise zeigt, wenn der jeweilige Stimulus alleine innerhalb seines rezeptiven Feldes gezeigt und nicht mit Aufmerksamkeit bedacht wird. Die Zelle weist also eine hohe Entladungsrate auf, wenn der bevorzugte Reiz beachtet wird und eine geringe Entladungsrate, wenn der nicht bevorzugte Reiz beachtet wird. Dieser Effekt wurde für Neurone in V2, V4, MT und dem inferioren Temporalkortex nachgewiesen (z.B. Chelazzi, Miller, Duncan & Desimone, 1993; Martinez-Trujillo & Treue, 2002; Moran & Desimone, 1985; Treue & Martinez-Trujillo, 1999) und die Größe des Effektes nimmt mit zunehmender Verarbeitungsstufe in der visuellen Hierarchie zu (Kastner, 1998). Dies wird darauf zurückgeführt, dass entlang der visuellen Verarbeitungshierarchie die Größe der rezeptiven Felder zunimmt (Blatt, Andersen & Stoner, 1990; Tootell et al., 1998) und damit die Wahrscheinlichkeit, dass zwei Stimuli in dasselbe rezeptive Feld fallen, steigt (Bles, Schwarzbach, De Weerd, Goebel & Jansma, 2006; Luck, Chelazzi, Hillyard & Desimone, 1997).

Die Zuwendung von Aufmerksamkeit scheint also zu bewirken, dass das rezeptive Feld des Neurons nur noch das beachtete Objekt enthält. Eine Reihe von Studien liefert Hinweise darauf, wie dies bewerkstelligt wird. So konnten verschiedene Einzelzellaufleitungsstudien zeigen, dass die Lenkung von Aufmerksamkeit in das rezeptive Feld eines Neurons in MT (Anton-Erxleben, Stephan & Treue, 2009; Womelsdorf, Anton-Erxleben, Pieper & Treue, 2006) oder V4 (Connor, Gallant, Preddie & Van Essen, 1996; Connor, Preddie, Gallant & Van Essen, 1997) zu einer Verschiebung des rezeptiven Feldes hin zu beachteten Stimuli führt, bzw. dass das Tracken von Objekten eine räumliche Anpassung der rezeptiven Felder von MT-Neuronen an die Trajektorien der zu verfolgenden Objekte bewirkt (Niebergall, Khayat, Treue & Martinez-Trujillo, 2011). Darüber hinaus bewirkte die Lenkung der

Aufmerksamkeit in das rezeptive Feld eines MT-Neurons eine Verkleinerung des rezeptiven Feldes um 5 bis 9 % (Anton-Erxleben et al., 2009; Womelsdorf, Anton-Erxleben, et al., 2006; Womelsdorf, Anton-Erxleben & Treue, 2008). In dieselbe Richtung weisen zwei fMRT-Studien, die zeigen konnten, dass Aufmerksamkeit das Aktivierungsprofil von Neuronenpopulationen in visuellen Arealen schärft, d.h., dass der Bereich des visuellen Feldes, der eine durch Aufmerksamkeit veränderte Aktivierung zeigt, kleiner wird (Fischer & Whitney, 2009; Kastner & Pinsk, 2004).

Neben der Veränderung der Entladungsrate von Neuronen wurden noch weitere modulierende Effekte von Aufmerksamkeit auf die neuronale Aktivität beschrieben. Hierzu zählt die Erhöhung der lokalen Gamma-Band-Synchronizität in den visuellen Arealen (z.B. Fries, Womelsdorf, Oostenveld & Desimone, 2008; Saalmann, Pigarev & Vidyasagar, 2007; Womelsdorf, Fries, Mitra & Desimone, 2006) oder eine Verringerung der Antwortvariabilität und damit Steigerung der Reliabilität der visuellen Neurone (Mitchell, Sundberg & Reynolds, 2007). All diesen Mechanismen ist gemein, dass sie das Signal-zu-Rausch-Verhältnis der Neurone oder Neuronenpopulationen, die eine selektierte Information kodieren, erhöhen und somit die Fähigkeit, relevante sensorische Eigenschaften akkurat darzustellen, verbessern (Noudoost et al., 2010; Treue, 2012). Dadurch findet eine neuronale Gewichtung des selektierten Stimulus statt, die sich möglicherweise in einer erhöhten BOLD-Antwort (vgl. 6.1.1) widerspiegelt (Beck & Kastner, 2009). Im nächsten Abschnitt sollen nun die neuronalen Quellregionen der selektiven Aufmerksamkeit erläutert werden.

### ***Neuronale Korrelate der Steuerung der Aufmerksamkeit***

Es gilt mittlerweile als gut gesichertes Erkenntnis, dass willkürliche selektive räumliche Aufmerksamkeit durch ein Netzwerk aus frontalen Augenfeldern (FEF), posteriorem parietalen Kortex (PPC) und superioren Colliculi (SC) kontrolliert wird (zusammenfassend siehe Baluch & Itti, 2011; Beck & Kastner, 2009; Bisley, 2011; Corbetta & Shulman, 2002; Knudsen, 2007; Yantis, 2008).<sup>7</sup> Dies ergibt sich aus einer Vielzahl von Studien an Primaten, die mit vielfältigen methodischen Zugängen immer wieder belegt haben, dass die Aktivität von Neuronen dieses fronto-parietalen Netzwerkes die Leistung in Aufmerksamkeitsaufgaben beeinflusst und die Signalstärke von Neuronen des visuellen Kortex moduliert (z.B. K. M. Armstrong, Fitzgerald & Moore, 2006; Lovejoy & Krauzlis, 2010; T. Moore & Armstrong, 2003). Auch bei Menschen zeigten fMRT-Studien konsistent, dass die Ausübung willentlicher Aufmerksamkeit mit einer Aktivierung des posterioren frontalen Kortex am Übergang

---

<sup>7</sup> Es wird vermutet, dass die gleichen Kontrollregionen auch die eigenschaftsbasierte Aufmerksamkeit lenken (vgl. Zhou & Desimone, 2011).

zwischen präzentralem Sulcus und superiorem frontalem Sulcus (funktional entsprechend den FEF; Paus, 1996; Petit, Clark, Ingeholm & Haxby, 1997) und des PPC entlang des intraparietalen Sulcus (IPS) und hineinreichend in den superioren Parietallappen (SPL) und den postzentralen Sulcus einhergeht (z.B. Bressler, Tang, Sylvester, Shulman & Corbetta, 2008; Corbetta, 1998; Hopfinger et al., 2000; Kastner et al., 1999). Es handelt sich dabei um kortikale Regionen, die auch an der Kontrolle von Augenbewegungen beteiligt sind, sodass heute davon ausgegangen wird, dass dasselbe Netzwerk sowohl offene als auch verdeckte Aufmerksamkeit lenkt (Awh, Armstrong & Moore, 2006; Bisley & Goldberg, 2010).<sup>8</sup>

Die Komponenten dieses Netzwerkes weisen eine enge Verschaltung auf (Überblick in Baluch & Itti, 2011) und ihnen ist gemein, dass sie *retinotop* organisiert sind (für Reviews siehe Silver & Kastner, 2009; Wandell, Dumoulin & Brewer, 2007), d.h., dass Orte, die im visuellen Feld bzw. auf der Retina nebeneinanderliegen, auch kortikal in hoher räumlicher Nähe verarbeitet werden (Goldstein, 2009). In der *Prioritätskarten-Hypothese* (*priority map hypothesis*) wird angenommen, dass sie gemeinsam eine interne Repräsentation des visuellen Feldes bilden und dass die relative Aktivität der Neurone innerhalb dieser Karte die aktuelle Relevanz der korrespondierenden Position im visuellen Feld widerspiegelt (Bisley & Goldberg, 2010; Gottlieb, 2007; Gottlieb et al., 2009). Es wird vermutet, dass die Aktivität innerhalb der Prioritätskarte sowohl top-down (z.B. durch die in räumliche Koordinaten umgesetzten aktuellen Ziele der Person) als auch bottom-up (z.B. in Form salienter Reize im visuellen Feld) beeinflusst werden kann. Des Weiteren wird nun davon ausgegangen, dass die räumliche Prioritätskarte maßgeblich an der Aufmerksamkeitsausrichtung beteiligt ist, insofern als die Orte im visuellen Feld, die den relativ am stärksten aktivierten Bereichen der Karte entsprechen, die sind, an denen sich die Aufmerksamkeit zur Zeit konzentriert oder zu denen in der Folge die Aufmerksamkeit gelenkt wird. Als Mechanismus, wie ein priorisierter Ort innerhalb der Karte längerfristig als solcher gekennzeichnet wird, wird derzeit die sogenannte *persistierende Aktivität* (*delay-period activity*) diskutiert (Ikkai & Curtis, 2011). Darunter versteht man eine erhöhte Aktivität von Neuronen in einer Phase, in der eine Repräsentation aufrechterhalten werden muss (Funahashi, Bruce & Goldman-Rakic, 1989). Diese Aktivität, die generell als Korrelat des Arbeitsgedächtnisses (Baddeley & Hitch, 1974) betrachtet wird, wurde auch in den FEF und im PPC beobachtet, wenn ein Zielreiz an einer bestimmten Stelle des visuellen Feldes erwartet wurde (z.B. K. M. Armstrong, Chang & Moore, 2009; Kastner et al., 1999)

---

<sup>8</sup> Verschiedene Studien weisen jedoch darauf hin, dass zumindest innerhalb der FEF verschiedene Neuronengruppen bei offener und verdeckter Aufmerksamkeit rekrutiert werden (Gregoriou, Gotts & Desimone, 2012; K. G. Thompson, Biscoe & Sato, 2005).

Innerhalb des fronto-parietalen Netzwerkes scheinen FEF und PPC in einem hierarchischen Verhältnis zu stehen, in dem die FEF die führende Rolle einnehmen (Bressler et al., 2008; Buschman & Miller, 2007; siehe jedoch Vossel, Weidner, Driver, Friston & Fink, 2012, die einen entgegengesetzten Informationsfluss beschreiben). Daneben deuten verschiedene Studien darauf hin, dass diese beiden Komponenten leicht voneinander abweichende Funktionen erfüllen. So scheint es, dass die FEF besonders auf aufmerksamkeitsbezogene bzw. visuo-motorische Verarbeitungen spezialisiert sind (z.B. Monosov & Thompson, 2009; T. Moore & Armstrong, 2003), während der PPC ein breiteres Aufgabenspektrum aufweist. Er wurde außer mit Aufmerksamkeit und Augenbewegungen auch mit sensorischer Verarbeitung (Toth & Assad, 2002), manuellen Antworten (Oristaglio, Schneider, Balan & Gottlieb, 2006), zielgerichtetem Verhalten (Maimon & Assad, 2006) und Belohnung (Sugrue, Corrado & Newsome, 2004) in Verbindung gebracht. Daraus wurde geschlossen, dass der PPC für die Integration aufgabenrelevanter sensorischer, motorischer, kognitiver und motivationaler Informationen zuständig ist und diese integrierte Information je nach Bedarf für sensorische Zwecke oder die Optimierung von Verhalten zur Verfügung stellt (Bisley & Goldberg, 2010; Gottlieb & Balan, 2010).

Die zentralen Komponenten des fronto-parietalen Netzwerkes sind auch konsistent aktiviert, wenn Objekte mit Aufmerksamkeit zu verfolgen sind. So zeigen mehrere fMRT-Studien, dass beim Verfolgen von Objekten mit Aufmerksamkeit ein Netzwerk aus FEF und PPC (hier im Besonderen der SPL, der anteriore IPS (AIPS) und der posteriore IPS (PIPS)) aktiv ist (Culham et al., 1998; Culham, Cavanagh & Kanwisher, 2001; Howe, Horowitz, Akos Morocz, Wolfe & Livingstone, 2009; Jovicich et al., 2001). Zusätzlich fanden sich beim Verfolgen von Objekten jedoch Aktivierungen in dem für die Wahrnehmung von Bewegungen spezialisierten Areal MT.

### ***Informationsfluss zwischen den verschiedenen Verarbeitungsebenen***

Abschließend soll an dieser Stelle kurz auf die Frage eingegangen werden, wie die neuronalen Quell- und Zielregionen der Aufmerksamkeit zusammenspielen, um die im Verhalten sichtbaren Aufmerksamkeitseffekte zu produzieren. Auch wenn die genauen Mechanismen noch nicht geklärt sind (Noudoost et al., 2010), wird diesbezüglich derzeit angenommen, dass frühe visuelle Areale in einem *Feedforward-Prozess*<sup>9</sup> Informationen über physikalische Eigenschaften der Reize an höhere visuelle Areale und das fronto-parietale Netzwerk weitergeben (Ikkai & Curtis, 2011) und endogene Aufmerksamkeit dann als ein Feedback-

---

<sup>9</sup> Unter visueller Feedforward-Verarbeitung versteht man die schnelle Bottom-Up-Weiterleitung visueller Informationen von niedrigeren an höhere visuelle Areale (Lamme & Roelfsema, 2000).

Mechanismus mit verzögertem (*delayed reentrant*) Feedback aus frontalen und parietalen Kortextbereichen die Neuronenaktivität in niedrigeren Arealen moduliert (z.B. Bressler et al., 2008; Lauritzen, D'Esposito, Heeger & Silver, 2009). Hinweise, dass diese Übertragung tatsächlich top-down abläuft, geben Studien, die entweder durch Einzelzellableitungen (Saalmann et al., 2007) oder mittels Konnektivitäts- (Bressler et al., 2008) bzw. Kohärenzanalysen (Lauritzen et al., 2009) zeigen, dass die Aktivität der fronto-parietalen Areale der Aktivität der jeweiligen visuellen Areale zeitlich vorausgeht.<sup>10</sup>

#### 2.4.2 Neuronale Korrelate der Auflösung der Aufmerksamkeit

Cavanagh und Kollegen (Cavanagh, 2004; Cavanagh, 2011; Intriligator & Cavanagh, 2001) vermuten die Ursache der relativ groben Auflösung der Aufmerksamkeit in den großen rezeptiven Feldern der Neurone des fronto-parietalen Netzwerkes. Diese Annahme ist in ein umfassenderes neurokognitives Modell eingebettet. So schlagen Cavanagh und Kollegen vor, die Auflösung der Aufmerksamkeit als kleinstmögliche Ausdehnung der Selektionsregion aufzufassen, deren Position im visuellen Feld in einer sogenannten Ortskarte (d.h. einer mentalen Repräsentation des visuellen Feldes; Treisman & Gelade, 1980; J. M. Wolfe, 1994), kodiert wird. Darüber hinaus nehmen sie an, dass der Bezug zwischen der Ortskarte und einem Stimulus im visuellen Feld durch sogenannte *Aufmerksamkeitszeiger* (*attentional pointers*) hergestellt wird (Cavanagh, 2011; Cavanagh, Hunt, Afraz & Rolfs, 2010; Intriligator & Cavanagh, 2001).<sup>11</sup> Diese Vorstellungen bringen sie mit verschiedenen neuronalen Korrelaten in Verbindung. Im Einklang mit gängigen Vorstellungen (siehe 2.4.1) schlagen sie das fronto-parietale Aufmerksamkeitsnetzwerk aus FEF, PPC und SC als neuronales Korrelat der Ortskarte vor. Analog der Prioritätskarten-Hypothese (z.B. Gottlieb et al., 2009; vgl. 2.4.1) gehen sie zudem davon aus, dass das Aufmerksamkeitsnetzwerk eine Prioritätskarte bildet, welche die Relevanz der Orte des visuellen Feldes in Form von relativen Aktivierungsstärken kodiert. In diesen relativen Aktivierungsstärken vermuten sie ein neuronales Korrelat der Aufmerksamkeitszeiger (Cavanagh et al., 2010; Rolfs, Jonikaitis, Deubel & Cavanagh, 2011). Es wird nun davon ausgegangen, dass die Neurone der

<sup>10</sup> Unter *Konnektivität* versteht man die Verknüpfungen eines Areals mit anderen Arealen. Hierbei ist *funktionelle* Konnektivität als zeitlicher Zusammenhang zwischen räumlich getrennten neurophysiologischen Ereignissen und *effektive* Konnektivität als Einfluss, den ein neuronales System auf die Aktivität eines anderen neuronalen Systems ausübt, definiert (Grefkes, Eickhoff & Fink, 2013). Unter *Kohärenzanalyse* versteht man die Analyse linearer Abhängigkeiten von EEG-Signalen (Shaw, 1984).

<sup>11</sup> Diese Aufmerksamkeitszeiger ähneln den von Pylyshyn (1989) vorgeschlagenen *fingers of instantiation* (*FINSTs*). Bei einem FINST handelt es sich um einen Mechanismus, der eine Referenz zwischen einem Ort oder Objekt im visuellen Feld und einer mentalen Repräsentation herstellt, sodass die mentale Repräsentation weiteren kognitiven Prozessen zugänglich gemacht werden kann. Während Pylyshyn davon ausgeht, dass FINSTs präattentive Mechanismen sind, die der Aufmerksamkeit einen schnelleren Zugang zu der durch sie indizierten Stelle erlauben, geht Cavanagh (2011) davon aus, dass es sich bei der Indizierung bereits um einen Aufmerksamkeitsprozess handelt.



Prioritätskarte Top-Down-Biassignale generieren können, die den Wettstreit zwischen verschiedenen Reizen, die sich gleichzeitig im rezeptiven Feld eines vorgeschalteten visuellen Neurons befinden, beeinflussen. Dies geschieht, indem die Biassignale in einem Feedbackvorgang (vgl. 2.4.1) die Eigenschaften der vorgeschalteten visuellen Neurone verändern (z.B. durch Verkleinerung der rezeptiven Felder dieser Neurone; Womelsdorf et al., 2008). Die Ursache für die (im Vergleich zur Sehschärfe) grobe Auflösung der Aufmerksamkeit wird nun in den relativ großen rezeptiven Feldern der Neurone des fronto-parietalen Aufmerksamkeitsnetzwerkes (Blatt et al., 1990; Tootell et al., 1998) vermutet (Cavanagh, 2011; Intriligator & Cavanagh, 2001). Aufgrund der recht großen Ausdehnung dieser rezeptiven Felder komme es bei eng platzierten Reizen leicht vor, dass mehrere Reize in das rezeptive Feld desselben fronto-parietalen Neurons fallen. In diesem Fall sei keine differentielle Beeinflussung der vorgeschalteten visuellen Neurone mehr möglich und die Reize könnten nicht mehr individuiert werden. Die Größe der rezeptiven Felder des fronto-parietalen Aufmerksamkeitsnetzwerkes stellt somit gemäß der Vorstellungen von Cavanagh und Kollegen (Cavanagh, 2004; Cavanagh, 2011; Intriligator & Cavanagh, 2001) die ultimative untere räumliche Begrenzung der Präzision der Top-Down-Modulation dar.

Das eben beschriebene Modell könnte eine Erklärung für die untere räumliche Grenze der Selektion liefern. Doch auch wenn dieser Vorschlag sich in großen Teilen auf aktuelle Vorstellungen stützt (vgl. 2.1.1 und 2.4.1), die für sich genommen in vielen Fällen empirisch belegt sind, steht eine dezidierte Testung und Bestätigung der spezifisch die Auflösung der Aufmerksamkeit betreffenden Hypothesen noch aus. Ein erster Schritt zur Bestätigung des Modells könnte beispielsweise in der Beantwortung der Frage bestehen, ob das fronto-parietale Netzwerk tatsächlich an der Herstellung einer räumlich präzisen Selektion beteiligt ist. Hier könnten erste Anhaltspunkte durch Studien geliefert werden, die sich mit den neuronalen Korrelaten zunehmend präziser räumlicher Selektion (d.h. dem Zusammenziehen des Aufmerksamkeitsfokus) beschäftigen, denn es ist davon auszugehen, dass Selektion im Größenbereich der Auflösung der Aufmerksamkeit und das zunehmende Zusammenziehen des Aufmerksamkeitsfokus mit ähnlichen neuronalen Korrelaten verknüpft sind. Doch auch im Zusammenhang mit dem Zusammenziehen des Aufmerksamkeitsfokus wird zwar vermutet, dass das fronto-parietale Netzwerk maßgeblich daran beteiligt ist (Stevens & Bavelier, 2012), gleichzeitig gibt es bisher aber bislang keine Studien, die dieser Vermutung nachgehen. Es gibt bisher lediglich eine Untersuchung, die möglicherweise erste Hinweise auf neuronale Korrelate räumlich präziser Selektion liefern kann. Hierbei handelt es sich um die Studie von Shim, Alvarez, Vickery und Jiang (2009), die mit einer Variante des MOT-

Paradigmas und fMRT die neuronalen Effekte zunehmender raum-zeitlicher Präzision während des attentionalen Verfolgens von Objekten untersucht. In dieser Studie wurden den Probanden rotierende Windrädchen dargeboten, die sich in unterschiedlicher Geschwindigkeit bewegen konnten. Die Probanden waren instruiert, jeweils eine Speiche eines oder mehrerer Rädchen zu verfolgen. Es zeigte sich, dass bei zunehmender Geschwindigkeit und damit zunehmender Anforderung an die raum-zeitliche Präzision des Trackings die neuronale Aktivität in den FEF und den visuellen Arealen V2 und V3 anstieg. Gleichzeitig blieb die Aktivität in den parietalen Regionen gleich. Die Ergebnisse deuten also darauf hin, dass erhöhte Anforderungen an die raum-zeitliche Präzision des Aufmerksamkeitsfokus mit einer erhöhten neuronalen Aktivität in den FEF einhergehen und es kann vermutet werden, dass es sich hierbei um das neuronale Korrelat der Top-Down-Signale handelt, die eine präzisere raum-zeitliche Selektion bewirken. Es wäre anzunehmen, dass ein ähnliches neuronales Muster auch auf die Präzision räumlicher Aspekte der Selektion (im Gegensatz zu raum-zeitlichen Aspekten wie in der Studie von Shim et al., 2009) zutrifft. Diese Vermutung ist jedoch bisher nicht belegt.

## 2.5 Synthese und integratives Modell

Bevor im zweiten Teil dieses Kapitels die bis hierhin betrachteten Aspekte unter einer Entwicklungsperspektive wieder aufgegriffen werden, sollen in diesem Abschnitt abschließend die bisher dargestellten kognitiven und neurowissenschaftlichen Befunde und Vorstellungen mit Bezug auf die Auflösung der Aufmerksamkeit zusammengefasst und in einem Modell integriert werden.

Es hat sich sowohl auf Verhaltens- als auch auf physiologischer Ebene gezeigt, dass die räumlichen Eigenschaften der Selektion keinem starren Zustand entsprechen, sondern eine dynamische Komponente besitzen. So beschreibt Jonides (1983; vgl. 2.1.1) Aufmerksamkeit auf Verhaltensebene als zweistufigen Prozess, bei dem auf der ersten Stufe das gesamte visuelle Feld gleichermaßen wahrgenommen wird, auf der zweiten Stufe Aufmerksamkeit auf einen bestimmten Bereich des visuellen Feldes konzentriert wird und vorwiegend Informationen aus diesem Bereich verarbeitet werden. Diese Vorstellung deckt sich mit aktuellen physiologisch basierten Vorstellungen, die annehmen, dass in einer ersten Welle alle Informationen des visuellen Feldes an die höheren Ebenen der visuellen Verarbeitungshierarchie (inklusive das fronto-parietale Netzwerk) weitergeleitet werden (Lamme & Roelfsema, 2000) und erst auf ein Feedback von höheren kortikalen Arealen hin eine Gewichtung des visuellen Inputs (also eine Selektion) vorgenommen wird (Hopf,

Boehler, Schoenfeld, Heinze & Tsotsos, 2010; Lauritzen et al., 2009). Es ist davon auszugehen, dass diese Feedback-Signale die Verarbeitung in visuellen Arealen verändern (z.B. durch Verschiebung oder Veränderung der Größe der rezeptiven Felder visueller Neurone; Womelsdorf et al., 2008; vgl. 2.4.1), was sich auf Verhaltensebene vermutlich in einer räumlich präziseren Wahrnehmung (im Sinne einer höheren Sehschärfe) ausdrückt (Anton-Erxleben & Carrasco, 2013; Carrasco, 2011; Yeshurun & Carrasco, 1998). Es kann spekuliert werden, dass die präzise Wahrnehmung die Voraussetzung für eine räumlich präzise Selektion ist, da aus einer homogenen Fläche keine Objekte bzw. Texturelemente individuiert werden können. In diesem Sinne wären räumlich präzise Wahrnehmung und Selektion ein sich wiederholender Vorgang mit einer Abfolge von Feedforward- und Feedback-Prozessen.

Wie eine Kombination aus Feedforward- und Feedbacksignalen zu einer Konstriktion der Selektionsregion führen können, beschreibt das *Selective-Tuning-Modell der Aufmerksamkeit* (z.B. Tsotsos, 1990, 2005). Hierbei handelt es sich um ein neuronales Netzwerkmodell, in dem ein hierarchisches visuelles System mit mehreren Ebenen zugrunde gelegt wird. Die verschiedenen Ebenen bestehen aus Neuronen, die innerhalb der visuellen Hierarchie sowohl nach oben (feedforward) als auch nach unten (feedback) als divergierende Pyramiden verschaltet sind (vgl. Abbildung 2.2). Wird nun ein Stimulus von der Input-Ebene registriert, aktiviert er in einem Feedforward-Prozess die mit dem registrierenden Neuron verschalteten Neuronen der höheren Ebenen, sodass eine umgekehrte Pyramide der Aktivierung entsteht. Daraufhin wird auf der obersten visuellen Ebene über das gesamte visuelle Feld hinweg das Neuron mit der höchsten Antwort errechnet. Diese ergibt sich einerseits aus der Aktivierung, die aus niedrigeren Ebenen an die höchste Ebene weitergegeben wurde. Andererseits kann die Aktivierung einzelner Neurone der höchsten Ebene auch durch einen Bias aus noch höheren Zentren, der sich an aktuellen Zielen und Prioritäten orientiert, beeinflusst werden. Beide Faktoren gehen zusammen in die Berechnung ein. Das Ergebnis der Berechnung wird durch Feedback an die unteren Ebenen weitergegeben. Dies geschieht, indem immer nur die direkt vertikale Verbindung erhalten wird und alle anderen Verbindungen gekappt werden. Dies wird Ebene für Ebene durchgeführt, sodass es zu einer zunehmenden räumlichen Einengung der Aktivierung innerhalb der visuellen Pyramide kommt.<sup>12</sup> Die engste räumliche Einengung, die vorgenommen werden kann, ließe sich als Auflösung der Aufmerksamkeit interpretieren.

---

<sup>12</sup> Prinzipiell kann die Einschränkung sich auch auf andere Dimensionen, wie z.B. Farbe, beziehen. Hier soll jedoch nur die räumliche Dimension betrachtet werden.

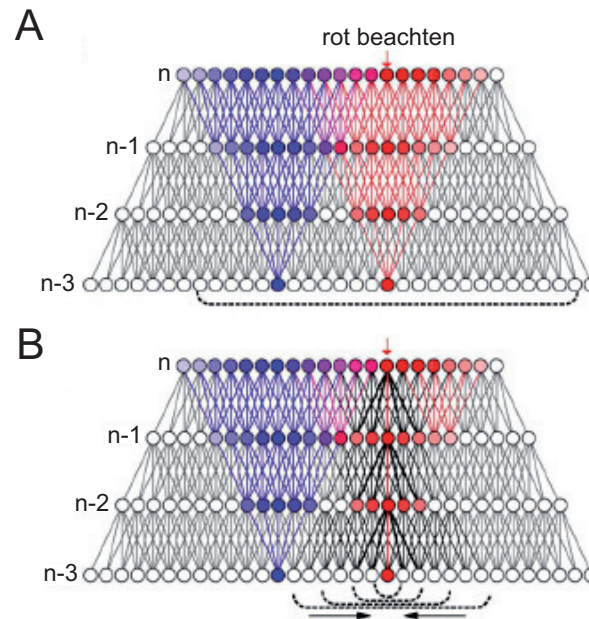


Abbildung 2.2: Das Selective-Tuning-Modell. In dieser Abbildung sind vier Ebenen von Neuronen dargestellt, die nach oben und unten als divergierende Pyramiden verschaltet sind. (A) Aktivierung, die durch zwei Reize, einen roten Zielreiz und einen blauen Distraktor, hervorgerufen wird. Die Klammer unterhalb der Input-Ebene stellt die räumliche Auflösung der durch die Reize hervorgerufenen Bottom-Up-Repräsentation dar. Nachdem die Stimulation die oberste Verarbeitungsebene erreicht hat, wird hier das Neuron mit der höchsten Antwort ermittelt, indem die Aktivierungen durch die unteren Ebenen der Verarbeitungshierarchie und der Top-Down-Bias verrechnet werden. (B) Weitergabe des Ergebnisses dieser Berechnung an die unteren Ebenen. Hierbei werden sukzessive alle Verbindungen außer der direkten vertikalen Verbindung gekappt (schwarze Verbindungen). Dies setzt sich durch die Ebenen durch und dabei erhöht sich nach und nach die räumliche Auflösung (dargestellt durch die Klammern unterhalb der Input-Ebene; aus Hopf, Boehler, Schoenfeld, Heinze und Tsotsos (2010)).

Das Selective-Tuning-Modell hat – wird es zur Analyse möglicher Grundlagen der Auflösung der Aufmerksamkeit herangezogen – den Vorteil, dass es die Prozesse, die zu einer Einengung des Fokus der Aufmerksamkeit führen, auf mehreren Ebenen der Verarbeitungshierarchie beschreibt und zudem aufzeigt, wie diese Ebenen zusammenspielen, um eine eng fokussierte Selektion herzustellen. Gleichzeitig bleibt das Modell relativ unspezifisch, was den Top-Down-Bias angeht, der die Berechnungen der Neurone der obersten visuellen Ebene zugunsten bestimmter Regionen des visuellen Feldes beeinflussen kann. Dieser Aspekt wird in anderen Modellen der Aufmerksamkeit, z.B. kognitionspsychologischen Modellen wie der *Merkmals-Integrations-Theorie* (*feature integration theory*) von Treisman und Gelade (1980) oder der *Theorie der gesteuerten Suche* (*guided search*) von Wolfe und Kollegen (z.B. J. M. Wolfe, 1994) stärker berücksichtigt. In diesen Modellen wird angenommen, dass das visuelle Feld in Form einer Karte repräsentiert wird, deren relativ höchste Aktivierung den Ort der Aufmerksamkeitsausrichtung angibt (vgl. 2.4.2). Für den aktuellen Zusammenhang besonders relevant ist, dass in der räumlichen

Verteilung der Aktivierungsstärken die aktuellen Ziele der Person (bzw. deren Umsetzung in räumliche Koordinaten) verrechnet sind und diese Ziele als (räumlich kodierte) Biassignale an untergeordnete visuelle Areale weitergegeben werden können. Um die Grundlagen der Auflösung der Aufmerksamkeit vollständig modellhaft abbilden zu können, wäre es daher sinnvoll, das Selective-Tuning-Modell und das Ortskartenmodell zu integrieren. Hiermit könnte auf höherer Hierarchieebene die Entstehung der Top-Down-Signale und auf unterer Ebene die Wirkung der Top-Down-Signale auf die visuelle Verarbeitung unter einer dynamischen Perspektive beschrieben werden. Zusätzlich konkretisieren lässt sich das kombinierte Modell durch eine Spezifizierung der relevanten neuronalen Korrelate. Als neuronales Substrat der Ortskarte und Quelle der Top-Down-Signale wird im Allgemeinen das fronto-parietale Netzwerk angenommen (z.B. Gottlieb & Balan, 2010; Yantis, 2008). Die Studie von Shim et al. (2009) deutet zudem darauf hin, dass die Top-Down-Biassignale, die im Zusammenhang mit der raum-zeitlichen Präzision der Selektion eine wichtige Rolle spielen, innerhalb des fronto-parietalen Netzwerkes speziell in den FEF generiert werden. Auch wenn raum-zeitliche Präzision nicht direkt mit räumlicher Präzision gleichzusetzen ist, gibt es doch Überschneidungen zwischen den beiden Konstrukten, sodass die FEF hier, zumindest vorerst, als neuronales Korrelat der für die räumliche Präzision der Selektion relevante Ortskarte angenommen werden sollen.

Im Selective-Tuning-Modell wird ebenfalls nicht berücksichtigt, wie die energetischen Bedingungen einer stärkeren oder schwächeren Restriktion des Fokus der Aufmerksamkeit aussehen. Die in 2.3 dargestellten Studien lassen jedoch vermuten, dass ein Verkleinern des Aufmerksamkeitsfokus und das dauerhafte Halten in diesem Zustand ressourcenaufwendig sind, und dass umso mehr Ressourcen benötigt werden, je enger der Fokus zusammengezogen wird. Das integrative Modell soll daher um die Annahme erweitert werden, dass die Generierung des Biassignals und das Weiterleiten des Signals durch die Ebenen ressourcenaufwendig sind.

Das eben beschriebene Modell soll in den weiteren Ausführungen implizit zugrunde gelegt werden und wird in der Gesamtdiskussion wieder aufgegriffen. Nachdem die für die vorliegende Arbeit wichtigsten Konzepte und empirischen Befunde für das Erwachsenenalter dargestellt wurden und in einem Modell zusammengefasst wurden, sollen diese Themen nun im Folgenden unter einer Entwicklungsperspektive wieder aufgegriffen werden. Hierzu wird zunächst grundlegend der derzeitige Forschungsstand zur Entwicklung der selektiven visuell-räumlichen Aufmerksamkeit erläutert.

## 2.6 Entwicklung der selektiven visuell-räumlichen Aufmerksamkeit

Säuglinge beginnen schon in den ersten Lebensmonaten, wichtige Komponenten der selektiven visuell-räumlichen Aufmerksamkeit zu erwerben (z.B. J. Atkinson, 2000; Richards, 2008). Diese Fähigkeiten sind jedoch nach dem 1. Lebensjahr noch rudimentär und werden in der Kindheit weiterentwickelt. In der Forschung zur Entwicklung der visuell-räumlichen Aufmerksamkeit wurden verschiedene Paradigmen herangezogen, um zu untersuchen, inwieweit Kinder in der Lage sind, ihre Verarbeitungsressourcen selektiv auf bestimmte Bereiche des visuellen Feldes auszurichten bzw. von anderen Bereichen abzuziehen. Die mit diesen Paradigmen gewonnenen Ergebnisse werden im Folgenden dargestellt. Es werden zunächst Studien mit dem Flankierreiz-Paradigma vorgestellt, die sich mit der Frage auseinandersetzen, inwieweit Kinder prinzipiell in der Lage sind, Informationen zu filtern (2.6.1). Im Anschluss wird dargestellt, inwieweit Kinder in der Lage sind, ihre Aufmerksamkeit im Raum auszurichten (2.6.2) und Objekte mit Aufmerksamkeit zu verfolgen (2.6.3).<sup>13</sup>

### 2.6.1 Filtern von Informationen

Der Versuchsaufbau, der typischerweise verwendet wird, um die Fähigkeit zum Filtern zu untersuchen, ist die Flankierreiz-Aufgabe (B. A. Eriksen & Eriksen, 1974; vgl. Box 1.1). Diese Aufgabe wurde bisher bei Kindern ab 4 Jahren eingesetzt. Während die Studien durchgehend zeigen, dass jüngere Kinder stärkere Flankierreiz-Effekte als Erwachsene zeigen (Enns & Akhtar, 1989; Goldberg, Maurer & Lewis, 2001; McDermott, Pérez-Edgar & Fox, 2007; Ridderinkhof & van der Molen, 1995; Ridderinkhof, van der Molen, Band & Bashore, 1997) ist das Alter, ab dem eine mit Erwachsenen vergleichbare Leistung gezeigt wird, umstritten. Während Rueda et al. (2004) erwachsenenähnliche Flankierreiz-Effekte ab einem Alter von 7 Jahren zeigen, ist dies gemäß der Studien von Ridderinkhof und Kollegen (Ridderinkhof & van der Molen, 1995; Ridderinkhof et al., 1997) erst ab einem Alter von 10 bis 12 Jahren oder gemäß Goldberg et al. (2001) erst nach 10 Jahren der Fall. In der Lebensspannenstudie von Waszak, Li und Hommel (2010) zeigten Kinder sogar erst ab 16 Jahren dieselbe Leistung wie Erwachsene. In den genannten Studien wird diskutiert, dass diese starken Variationen durch Unterschiede in den Versuchsaufbauten, vor allem in Bezug auf räumliche Konfigurationen oder perzeptuelle Load zustande kommen. Daneben gibt es ebenfalls eine offene Diskussion darüber, welche Fähigkeit den sich verbessernden

---

<sup>13</sup> Die Verläufe anderer Aspekte der Aufmerksamkeitsentwicklung sollen hier nicht weiter thematisiert werden. Sie sind nachzulesen z.B. in Hanania und Smith (2010), Posner, Rueda und Kanske (2007) und Ridderinkhof und van der Stelt (2000).

Leistungen zugrunde liegt. Während Enns und Akhtar (1989) annehmen, dass sich die Fähigkeit zum Filtern perzeptueller Informationen verbessert, gehen Ridderinkhof und Kollegen (Ridderinkhof & van der Molen, 1995; Ridderinkhof et al., 1997; Ridderinkhof & van der Stelt, 2000) davon aus, dass mit zunehmendem Alter die Unterdrückung der durch die Distraktoren hervorgerufenen inkompatiblen Antworttendenzen effektiver gelingt. Diese Schlussfolgerung basiert auf den Befunden der Studie von Ridderinkhof und van der Molen (1995), in der sich zeigt, dass die Komponente der ereigniskorrelierten Potentiale (EKPs), die der visuellen Verarbeitung zugerechnet wird (P3b), bei Erwachsenen und Kindern fast identisch ist, während die EKP-Komponente, die mit der motorischen Reaktion in Verbindung gebracht (LRP) und damit einer späteren Verarbeitungsstufe zugerechnet wird, bei Kindern im Vergleich zu Erwachsenen stark verändert ist. Daraus schließen die Autoren, dass es bei Kindern einen stärker ausgeprägten Antwortkonflikt gibt, der sich erst später in der Entwicklung dem Erwachseneniveau angleicht.

### **2.6.2 Ausrichtung der Aufmerksamkeit**

Die exogene Ausrichtung der Aufmerksamkeit im räumlichen Hinweisreiz-Paradigma (Posner, 1980; vgl. Box 1.1) scheint sich ab einem frühen Alter nicht mehr bedeutsam zu verändern. Bereits Dreijährige (Ristic & Kingstone, 2009) und auch ältere Kinder (Enns & Brodeur, 1989; Iarocci, Enns, Randolph & Burack, 2009; Waszak et al., 2010) reagieren mit einem erwachsenenähnlichen Reaktionszeitvorteil auf periphere Hinweisreize. Die Effekte des Hinweisreizes sind bei Kindern bis zu einem Alter von etwa 10 Jahren sogar ausgeprägter als bei Erwachsenen, was darauf zurückgeführt wird, dass Kinder länger brauchen, um ihren Aufmerksamkeitsfokus willentlich von invalide indizierten Orten abzuziehen (Wainwright & Bryson, 2002; Waszak et al., 2010).

Studien zur endogenen Aufmerksamkeitsausrichtung zeigen, dass auch diese Fähigkeit schon mit etwa 3 Jahren erwachsenenähnlich ist (Ristic & Kingstone, 2009) und Verbesserungen nur noch in Teilkomponenten stattfinden (Goldberg et al., 2001; Iarocci et al., 2009; Wainwright & Bryson, 2005). Dazu gehört, dass sich die Bewegung hin zum indizierten Ort mindestens bis über das Alter von 11 Jahren hinaus beschleunigt (Pearson & Lane, 1990) und dass die Aufmerksamkeit mit zunehmendem Alter möglicherweise länger am indizierten Ort angebunden wird. Brodeur und Enns (1997) und Ristic und Kingstone (2009) zeigten, dass der Reaktionszeitvorteil des Hinweisreizes bei Kindern unter 8 Jahren nur bei einem kurzen Zeitintervall zwischen der Darbietung von Hinweisreiz und Zielreiz (SOA) sichtbar war, bei längeren SOA (1s) aber verschwand. Diesem Ergebnis widersprechen jedoch die Studien von Goldberg et al. (2001), Pearson und Lane (1990) und Wainwright und Bryson (2005), die ab

einem Alter von 6 Jahren ein mit Erwachsenen vergleichbares Reaktionszeit-Muster auch bei langen SOA zeigen.

Deutliche Unterschiede zwischen verschiedenen Altersgruppen werden dagegen sichtbar in der Fähigkeit, reflexives Orienting willentlich zu modulieren. Hier konnten Iarocci et al. (2009) in einer Studie mit fünf-, sieben- und neunjährigen Kindern und mit Erwachsenen zeigen, dass Fünfjährige deutlich stärker als ältere Kinder und Erwachsene durch invalide periphere Hinweisreize beeinträchtigt werden. Dieses Ergebnis wurde von Ristic und Kingstone (2009) für den jüngeren Altersbereich von 3 bis 6 Jahren ausgeweitet.<sup>14</sup>

Eine weitere Aufgabe, mit der man die Bewegung des Aufmerksamkeitsfokus im visuellen Feld untersucht, ist die visuelle Suchaufgabe (Treisman & Gelade, 1980; vgl. Box 1.1). Während die parallele Suche schon früh, d.h. ab dem 1. Lebensjahr, sehr leistungsfähig ist (Gerhardstein & Rovee-Collier, 2002) und sich im Weiteren nur noch wenig bis gar nicht verändert (Dye & Bavelier, 2010; Hommel, Li & Li, 2004; Lobaugh, Cole & Rovet, 1998; Trick & Enns, 1998), zeigt die serielle Suche einen verzögerten Entwicklungsverlauf, der sich gemäß einiger Studien bis in das Erwachsenenalter hinzieht (Lobaugh et al., 1998; Trick & Enns, 1998). Trick und Enns (1998) führen diese Entwicklung darauf zurück, dass Kinder ihren Aufmerksamkeitsfokus mit zunehmendem Alter schneller und effektiver willentlich durch die Stimulusanordnung lenken können. Eine aktuelle Studie von Garrad-Cole, Shapiro und Thierry (2011) zeigt jedoch, dass, wenn die generellen Reaktionszeit-Unterschiede zwischen Kindern und Erwachsenen berücksichtigt werden, zwischen dem 7. Lebensjahr und dem Erwachsenenalter keine Veränderungen in der seriellen Suche auftreten. Es gibt jedoch gleichzeitig Hinweise darauf, dass jüngere Kinder durch die Präsenz von Distraktoren in der Suche stärker als Erwachsene gestört werden (Hommel et al., 2004; Trick & Enns, 1998) bzw. es ihnen nicht gelingt, die Suche auf potentielle Zielreize einzuschränken (Merrill & Lookadoo, 2004). Inwieweit diese Ergebnisse auch durch Nichtbeachtung der Reaktionszeit-Unterschiede zwischen Kindern und Erwachsenen zustande kommen, ist ungeklärt.

---

<sup>14</sup> An dieser Stelle soll auf eine Problematik hingewiesen werden, die auf alle Paradigmen zutrifft, die Entwicklung über die Veränderung von Reaktionszeiten untersuchen. Bis in die späte Kindheit zeigen die verschiedenen Altersgruppen deutliche Reaktionszeitunterschiede und Unterschiede im Ausmaß der Variabilität der Reaktionszeiten (z.B. Kail, 1991; Rueda et al., 2004). Diese machen es schwer, Entwicklung aus der Größe und den Veränderungen von Reaktionszeitunterschieden herauszulesen (Ridderinkhof & van der Molen, 1997; Ridderinkhof & van der Stelt, 2000), wie es in den meisten hier beschriebenen Paradigmen versucht wird. Dieser Problematik versuchen manche Forscher mit veränderten Berechnungsansätzen, in denen beispielsweise die absolute Höhe der Reaktionszeiten berücksichtigt wird, zu begegnen (z.B. Garrad-Cole, Shapiro & Thierry, 2011; Goldberg, Mauer & Lewis, 2001). Auch diese Ansätze sind jedoch nicht problemfrei (Ridderinkhof & van der Molen, 1997), sodass die meisten Forscher weiterhin auf absolute Reaktionszeit-Unterschiede zurückgreifen. Generell muss also der Schluss gezogen werden, dass Entwicklungstrends, die aus Reaktionszeitdaten gezogen werden, mit Vorsicht zu betrachten sind.



### **2.6.3 Verfolgen von Objekten**

Die prinzipiell schon im Säuglingsalter gegebene Fähigkeit, Objekte längerfristig durch den Raum zu verfolgen (Richardson & Kirkham, 2004), die typischerweise mit dem Object-Tracking-Paradigma (vgl. 2.2.2) untersucht wird, verbessert sich während des frühen und mittleren Kindesalters noch deutlich. O'Hearn und Kollegen (O'Hearn, Hoffman & Landau, 2010; O'Hearn, Landau & Hoffman, 2005) zeigen, dass Kinder mit 3 Jahren noch nicht in der Lage sind, ein Objekt zuverlässig über einen längeren Zeitraum zu verfolgen und dass sich diese Fähigkeit zwischen 4 und 6.5 Jahren graduell verbessert. Kinder mit 6.5 Jahren zeigten bei der von O'Hearn et al. verwendeten Trackingdauer von 6 s bereits optimale Genauigkeit. Verlängert man das Trackingintervall auf 10 s wie in den Studien von Trick und Kollegen (Trick, Hollinsworth & Brodeur, 2009; Trick, Jaspers-Fayer & Sethi, 2005) zeigen Kinder erst mit 9 Jahren optimale Genauigkeit. Siebenjährige Kinder weisen noch eine etwas geringere Genauigkeit auf. Zwei weitere Tracking-Studien von Beaton et al. (2010) und Ho et al. (2006), die nicht zwischen Altersklassen differenzieren, zeigen ein ähnliches Muster. Zusammengefasst deuten diese Ergebnisse darauf hin, dass in Abhängigkeit von der Länge der Trackingphase Kinder ab einem Alter von 6 bis 9 Jahren sehr zuverlässig in der Lage sind, ein Objekt längerfristig mit Aufmerksamkeit zu verfolgen.

### **2.6.4 Fazit**

Zusammenfassend lässt sich also festhalten, dass sich die Leistungen von Kindern in verschiedenen Aufgaben, die die visuell-räumliche Selektion messen, verbessern. Erstens steigert sich, wie in Flankierreiz-Aufgaben und Aufgaben zum Tracking von Objekten deutlich wurde, die eigentliche Selektionsleistung, d.h. das Hervorheben bzw. Unterdrücken von Teilen des visuellen Feldes. Zweitens scheint die Ausrichtung der Aufmerksamkeit effektiver, d.h. schneller, und drittens flexibler zu werden, d.h., dass die Kinder zunehmend besser in der Lage sind, ihre Aufmerksamkeit von irrelevanten Orten abzuziehen oder sich gegen irrelevante Reize abzuschirmen. Viertens wird die Selektion nachhaltiger, d.h. Kinder sind in endogenen Hinweisreiz- (vgl. Box 1.1) und Object-Tracking-Aufgaben immer länger in der Lage, den Fokus der Aufmerksamkeit an einen Ort zu binden. Ein genereller Trend, der sich damit abzeichnet, scheint also zu sein, dass Kinder die Selektion zunehmend willentlich und reizunabhängig steuern können.

## **2.7 Entwicklung der Auflösung der Aufmerksamkeit**

In diesem Abschnitt soll sich der Frage genähert werden, wie sich die Auflösung der Aufmerksamkeit im Kindes- und Jugendalter entwickelt. Dezidiert wurde diese Frage bisher

nicht untersucht. Erste Hinweise können jedoch möglicherweise Studien liefern, die mit dem Flankierreiz- und dem Crowding-Paradigma untersucht haben, inwieweit Kinder in der Lage sind, räumlich eng platzierte Objekte einzeln zu selektieren. Diese Studien werden im Folgenden dargestellt.

Enns und Girgus (1985) untersuchten mit einer Variante des Flankierreiz-Paradigmas inwieweit Kinder in der Lage sind, die Größe ihres Aufmerksamkeitsfokus an die jeweiligen Anforderungen der Aufgabe anzupassen. Hierzu boten sie fünf-, acht- und zehnjährigen Kindern und Erwachsenen einen Zielreiz und einen Distraktor mit variierendem Abstand ( $0.5^\circ$ ,  $2^\circ$ ,  $4^\circ$ ,  $8^\circ$  und  $16^\circ$  Sehwinkel) dar. Es zeigte sich, dass Kinder umso stärker durch den Distraktor beeinflusst wurden, je jünger sie waren, und dass dieser Effekt umso größer war, je geringer die Distanz zwischen Zielreiz und Distraktor war. Während die Diskriminationsleistung von Fünfjährigen bei einem Zielreiz-Distraktor-Abstand bis  $4^\circ$  beeinträchtigt war, zeigten die Achtjährigen nur bis  $2^\circ$  und die Zehnjährigen nur bei  $0.5^\circ$  einen Flankierreiz-Effekt. Erwachsene waren bei keinem Abstand durch den Distraktor beeinflusst. Die Autoren deuten dies als Indiz dafür, dass Kinder in der Lage sind, ihren Fokus der Aufmerksamkeit zunehmend enger zusammenzuziehen.

Dieses Ergebnis wird von Pastò und Burack (1997) bestätigt, die ebenfalls in einer Flankierreiz-Aufgabe den Einfluss des Distraktorabstandes ( $0.95^\circ$  vs.  $5.7^\circ$ ) auf die Diskriminationsleistung von vier-, fünf-, sieben- bzw. neunjährigen Kindern und von Erwachsenen untersuchten. In dieser Studie wurden Vierjährige sowohl durch nahe als auch durch entfernte Distraktoren beeinflusst, während die fünf- bis neunjährigen Kinder nur durch die nahen Distraktoren beeinträchtigt wurden. Für die Leistung von Erwachsenen spielten auch die nahen Distraktoren keine Rolle. Die Autoren schließen daraus, dass Kinder mit 4 Jahren den Fokus der Aufmerksamkeit nicht enger als auf einen Radius von  $5.7^\circ$  und mit 5 bis 9 Jahren nicht enger als auf  $0.95^\circ$  zusammenziehen können, während Erwachsene auch diese Grenze unterschreiten können.

Die beiden genannten Flankierreiz-Studien weisen also darauf hin, dass Kinder mit zunehmendem Alter besser in der Lage sind, ihren Fokus der Aufmerksamkeit zusammenzuziehen. Im Detail zeichnen sie jedoch ein inkonsistentes Bild des Entwicklungsverlaufs. Während Enns und Girgus (1985) eine fortwährende Verbesserung dieser Fähigkeit im Kindesalter beobachten, verbessert sie sich bei Pastò und Burack (1997) im Kindesalter lediglich zwischen 4 und 5 Jahren und ist danach stabil. Gemeinsam ist beiden Studien lediglich, dass das höchste untersuchte Alter (9 bzw. 11 Jahre) in beiden Studien noch nicht erwachsenenähnlich ist. Außerdem stimmen die beiden Studien nicht in ihren

Schätzungen überein, wie eng der Fokus der Aufmerksamkeit in den verschiedenen Altersgruppen zusammengezogen werden kann. Während in der Studie von Pastò und Burack Fünfjährige den Radius ihrer Selektionsregion auf unter  $1^\circ$  Sehwinkel reduzieren können, sind sie in der Studie von Enns und Girgus nicht in der Lage, ihn unter  $4^\circ$  zusammenzuziehen. Auch die Werte für Achtjährige stimmen in den beiden Studien ( $1^\circ$  bei Pastò und Burack und bis zu  $2^\circ$  bei Enns und Girgus) nicht überein.

Noch einmal abweichende Werte ermittelten Akhtar und Enns (1989) in einer weiteren Flankierreiz-Studie mit fünf-, sieben- und neunjährigen Kindern und mit Erwachsenen. In dieser Studie präsentierten sie einen Zielreiz und Distraktor mit konstantem Abstand von  $0.2^\circ$  Sehwinkel und boten zusätzlich in einem Teil der Durchgänge vorab einen exogenen Hinweisreiz an derselben Stelle dar. In Durchgängen ohne Hinweisreiz beobachteten sie den typischen abnehmenden Flankierreiz-Effekt mit zunehmendem Alter. Dieser verschwand jedoch in allen Altersgruppen, wenn vorher der Hinweisreiz dargeboten worden war. Diese Ergebnisse deuten darauf hin, dass bereits Fünfjährige ihre Aufmerksamkeit noch enger fokussieren können, als dies in den Studien von Enns und Girgus (1985) und Pastò und Burack (1997) geschätzt wurde. Dies gilt zumindest, wenn sie dabei Hilfestellungen erhalten.

Auch wenn diese Ergebnisse erste Hinweise darauf liefern, dass sich die Verarbeitung räumlich eng zusammenliegender Objekte verbessert, weist das Flankierreiz-Paradigma verschiedene Probleme auf, die es fraglich machen, ob dieser Ansatz tatsächlich geeignet ist, die untere räumliche Grenze der Selektion zu erfassen. Ein konzeptionelles Problem besteht darin, dass im Flankierreiz-Paradigma für erfolgreiche Leistung nicht nur eine Selektion sondern auch eine Identifikation der relevanten Reize notwendig ist (vgl. 2.2.1). Somit bleibt unklar, ob die sich in Flankierreiz-Aufgaben entwickelnde Fähigkeit tatsächlich die Selektion betrifft oder ob die Gründe für Leistungsverbesserungen auf anderen Verarbeitungsebenen zu suchen sind. Ein methodologisches Problem der bisherigen Flankierreiz-Studien besteht darin, dass in ihnen nur eine sehr begrenzte Anzahl von Zielreiz-Distraktor-Abständen getestet wurde und diese somit nur eine sehr grobe Schätzung für die Größe des Aufmerksamkeitsfokus liefern können.

Die zweite Schwierigkeit entfällt bei den Studien, die mit dem Crowding-Paradigma (Bouma, 1970; vgl. Box 1.1) die Entwicklung der Wahrnehmung eng platzierter Objekte untersuchen. Hier werden sehr feine Abstufungen des Zielreiz-Distraktor-Abstandes verwendet, die es erlauben, den kritischen Abstand zwischen Zielreiz und Distraktor sehr präzise zu bestimmen. Mit dieser Herangehensweise beobachteten Farzin, Rivera und Whitney (2010) dass der kritische Abstand zwischen Zielreiz und Distraktoren zwischen dem 6. und 15. Lebensmonat

signifikant abnimmt, mit 15 Monaten jedoch immer noch doppelt so groß ist wie bei Erwachsenen. Bondarko und Kollegen untersuchten den Crowding-Effekt bei drei- bis neunjährigen Kindern (Semenov et al., 2000) und acht- bis siebzehnjährigen Kindern und Jugendlichen (Bondarko & Semenov, 2005) mit Landolt-Ringen und Snellen-Haken, die jeweils von Balken umgeben waren. Sie zeigten, dass der kritische Abstand zwischen zentralem Zielreiz (beide Typen) und flankierenden Balken über die Kindheit graduell abnimmt, bis mit 11.5 Jahren eine Leistung erreicht wird, die sich bis 17 Jahre nicht mehr verändert. In einer weiteren Studie boten Bondarko und Semenov (2005) als Stimulusmaterial ein zentrales Gittermuster an, das von anderen Gittermustern umgeben war. Bei dieser Stimuluskonfiguration blieb der kritische Abstand erst ab 15 Jahren stabil. In den Studien von Bondarko und Kollegen bleibt unklar, ob die Werte, von denen sie annehmen, dass es sich dabei um das Ende des Entwicklungsverlaufs handelt, tatsächlich Erwachsenenwerte sind, da sie selbst keine Erwachsenenstichproben erheben. Dies leisten Jeon et al. (2010), die die Entwicklung von Crowding bei fünf-, acht- und elfjährigen Kindern und bei Erwachsenen untersuchten. Sie verwendeten ein Sloan-E umgeben von Balken als Reizkonfiguration. Der Wert für den kritischen Abstand, den sie für die Erwachsenen beobachteten, lag mit 2.35 Winkelminuten signifikant unter dem kritischen Abstand aller Kindergruppen. Diese unterschieden sich hinsichtlich ihres kritischen Abstandes nicht bedeutsam voneinander (Fünfjährige: 7.38; Achtjährige: 6.35; Elfjährige: 5.56 Winkelminuten).<sup>15</sup>

In der Summe ergeben die Studien zum Crowding ein uneinheitliches Bild. Sie stimmen zwar darin überein, dass es zwischen früher Kindheit und Erwachsenenalter eine Veränderung im räumlichen Ausmaß des Crowding-Effektes gibt, ein einheitlicher Entwicklungsverlauf oder Endpunkt der Entwicklung geht aus den Studien jedoch nicht hervor. Während Bondarko und Kollegen (Bondarko & Semenov, 2005; Semenov et al., 2000) graduelle Veränderungen im Kindesalter und ein Ende der Entwicklung teilweise schon mit 12 Jahren beobachten, ist der Crowding-Effekt bei Jeon et al. (2010) über das Kindesalter hinweg relativ stabil, zeigt jedoch zum Erwachsenenalter hin noch einmal eine deutliche Veränderung. Zusätzlich weisen aus konzeptioneller Sicht auch die Crowding-Studien den Nachteil auf, dass sie zur erfolgreichen Bewältigung der Aufgabe sowohl Selektion als auch Identifikation der Objekte erfordern, sodass letzten Endes unklar bleibt, ob die Entwicklung auf der Ebene der Individuation oder der Ebene von Wahrnehmung bzw. Verarbeitung von Eigenschaften stattfindet.

---

<sup>15</sup> Die Werte von Jeon, Hamid, Maurer und Lewis (2010) sind ursprünglich als Vielfache der Strichstärke angegeben, die in einem Kontrollexperiment zur Sehschärfe als Schwellenwert für jede Altersstufe ermittelt worden waren. Bei den hier angegebenen Werten handelt es sich um von der Autorin in Winkelminuten umgewandelte approximative Werte.

Insgesamt deuten die in diesem Abschnitt dargestellten Studien darauf hin, dass die Zuwendung von Aufmerksamkeit mit zunehmendem Alter auf ein immer kleineres räumliches Ausmaß begrenzt werden kann. Die Studien belegen somit einen Trend zu einer zunehmend präzisen Verarbeitung, der auch in Studien zur Entwicklung des Arbeitsgedächtnisses für Eigenschaften (Burnett Heyes, Zokaei, van der Staaij, Bays & Husain, 2012) oder Orte (Luna, Garver, Urban, Lazar & Sweeney, 2004; Olesen, Macoveanu, Tegner & Klingberg, 2006; Schutte, Spencer & Schöner, 2003) beobachtet wurde.

## **2.8 Entwicklung der Verarbeitungskapazität als Grundlage der Entwicklung der Auflösung der Aufmerksamkeit**

In diesem Abschnitt soll der Frage nachgegangen werden, inwieweit es sich bei der Zunahme der Verarbeitungskapazität im Laufe des Kindes- und Jugendalters um einen Faktor handeln könnte, welcher der sich entwickelnden Auflösung der Aufmerksamkeit zugrunde liegt. Hierzu wird zunächst eine Gruppe von Entwicklungstheorien vorgestellt, gemäß der kognitive Entwicklung auf einer Zunahme der Verarbeitungskapazität basiert (2.8.1), und im Anschluss auf die Frage eingegangen, wie sich die Verarbeitungskapazität im Kindes- und Jugendalter entwickelt (2.8.2). Schließlich werden Entwicklungsstudien dargestellt, die einen Zusammenhang zwischen der Entwicklung der Verarbeitungskapazität und der Genauigkeit der Selektion herstellen (2.8.3).

### **2.8.1 Theoretische Überlegungen zur Entwicklung der Verarbeitungskapazität**

Wie in Kapitel 2.3 dargelegt, scheint die Herstellung einer kleinen Selektionsregion ressourcenaufwendig zu sein. Es liegt somit nahe, die Ursachen der sich verändernden Auflösung der Aufmerksamkeit im Kontext der Verarbeitungskapazität zu suchen. Tatsächlich nimmt die Verarbeitungskapazität eine zentrale Rolle in einer prominenten Gruppe kognitiver Entwicklungstheorien ein. Diese Theorien, die unter dem Begriff *neopiagetische Entwicklungstheorien* zusammengefasst werden (z.B. Barrouillet & Gaillard, 2011b; Mora, 2007), bauen auf dem Stufenkonzept von Piaget (1983) auf und befassen sich im Kern mit der Frage, welche genauen Entwicklungsveränderungen dem Durchlaufen der von Piaget beschriebenen Stufen und damit der Entwicklung des logischen Denkens zugrunde liegen (Halford & Andrews, 2011). In diesen Theorien wird angenommen, dass es eine begrenzte Verarbeitungskapazität gibt und dass diese Verarbeitungskapazität mit steigendem Alter zunimmt. Darüber hinaus wird postuliert, dass diese Zunahme es erlaubt, immer größere Informationsmengen zu verarbeiten. Dies wiederum sei die Grundlage dafür, dass zunehmend komplexere Probleme gelöst werden können. Kurz gefasst besagen diese Theorien also, dass

die Steigerung der Verarbeitungskapazität die Grundlage der kognitiven Entwicklung darstellt (Barrouillet & Gaillard, 2011a).

Innerhalb der Gruppe der neo-piagetschen Entwicklungstheorien wurden von verschiedenen Autoren unterschiedliche Ideen von Verarbeitungskapazität entwickelt. Pascual-Leone (1970) nimmt an, dass die kognitiven Fähigkeiten von Kindern durch die Kapazität eines *zentralen Verarbeitungsraums* (*M-Space*) bestimmt werden. Dieser M-Space ist charakterisiert durch die Anzahl der Informationseinheiten, die ein Individuum mit seinen „mental Strukturen“ (Pascual-Leone, 1970; S. 302) gleichzeitig aktivieren und koordinieren kann. Es wird angenommen, dass diese Anzahl der Informationseinheiten im Laufe der Entwicklung stetig zunimmt und dass die Kinder aufgrund dieses Zuwachses zunehmend komplexes Material verarbeiten können. Die auf der Theorie von Pascual-Leone aufbauende *Relational-Complexity-Theorie* von Halford und Kollegen (Andrews & Halford, 2002; Halford, Wilson & Phillips, 1998) geht ebenfalls davon aus, dass die Zunahme der Verarbeitungskapazität (welche von Halford als Kapazität der zentralen Exekutive nach Baddeley konzipiert wird) die Grundlage der kognitiven Entwicklung darstellt. Die Verarbeitungskapazität manifestiere sich jedoch nicht in der Anzahl der Informationseinheiten, die gleichzeitig koordiniert werden können (wie von Pascual-Leone angenommen), sondern vielmehr in der Anzahl der Variablen oder Dimensionen, die simultan manipuliert werden können. Die steigende Anzahl von Variablen erlaube es, zunehmend komplexe mentale Modelle zu konstruieren und somit zunehmend komplexe Probleme zu lösen. Das umfassende Modell von Demetriou (Demetriou & Mouyi, 2011) versteht Verarbeitungskapazität hingegen explizit als Arbeitsgedächtniskapazität, welche wiederum in einem die Vorstellungen von Pascual-Leone und Halford integrierenden Sinne als maximale Menge und Komplexität der Repräsentationen und mentalen Handlungen, die gleichzeitig koordiniert werden können, definiert wird. Demetriou schlägt hiermit eine Brücke zu der umfangreichen Forschung, die sich mit der Entwicklung des Arbeitsgedächtnisses beschäftigt. Diese Forschungslinie, die sich weitgehend unabhängig von der neo-piagetschen Tradition entwickelt hat (Barrouillet & Gaillard, 2011b), geht ebenfalls davon aus, dass die Zunahme der Verarbeitungskapazität die wichtigste Determinante der geistigen Entwicklung (Cowan, 2013) darstellt. Verarbeitungskapazität wird hier als Arbeitsgedächtniskapazität verstanden.

Mit den neo-piagetschen Theorien und der Forschung zur Entwicklung des Arbeitsgedächtnisses beschreiben also zwei wichtige Forschungslinien innerhalb der kognitiven Entwicklungsforschung die Zunahme der Verarbeitungskapazität als wichtigen der

kognitiven Entwicklung zugrunde liegenden Faktor. Im folgenden Abschnitt sollen nun empirische Befunde zur Entwicklung dieses Faktors dargestellt werden.

### **2.8.2 Entwicklung der Verarbeitungskapazität: Empirische Befunde**

Auf der Grundlage des neo-piagetschen Modells wurde eine große Menge Untersuchungen durchgeführt, die sich mit der Frage beschäftigen, ob die Verarbeitungskapazität im Laufe der Kindheit und Jugend zunimmt und wie sich der Entwicklungsverlauf charakterisieren lässt. In einer frühen Untersuchung zeigte beispielsweise Pascual-Leone (1970), dass die Größe des M-Space im Laufe der Entwicklung stetig zunimmt. Er ermittelte für Kinder mit 3 Jahren einen M-Space von einer Einheit, der in der Folge alle 2 Jahre um eine Einheit anwächst, bis mit 15 Jahren der Erwachsenenwert von sieben Einheiten erreicht wird. Halford und Kollegen (Andrews & Halford, 2002; Halford et al., 1998) zeigten ebenfalls einen Anstieg ihres Kapazitätsmaßes, der relationalen Komplexität, mit zunehmendem Alter. Sie beobachteten, dass Kinder mit 1 Jahr eine Dimension, mit 2 Jahren zwei Dimensionen, mit 5 Jahren drei Dimensionen und mit 11 Jahren vier Dimensionen, was dem Wert von Erwachsenen entspricht, verarbeiten können (Halford & Andrews, 2011; Halford et al., 1998).

Auch Untersuchungen, die nicht dem neo-piagetschen Rahmenmodell zuzuordnen sind und Verarbeitungskapazität als Arbeitsgedächtniskapazität verstehen, zeigen einen stetigen Kapazitätszuwachs über die Kindheit hinweg bis in das Erwachsenenalter (zusammengefasst z.B. in Astle & Scerif, 2011; Cowan & Alloway, 2009; Cowan et al., 2005; Gathercole, Pickering, Ambridge & Wearing, 2004). Gleiches gilt für Studien, in denen Verarbeitungskapazität im Sinne von Aufmerksamkeitskapazität untersucht wird. Mit dem MOT-Paradigma (vgl. 2.1.2) wurde gezeigt, dass die Menge an Objekten, die von Kindern verfolgt werden können, mit zunehmendem Alter graduell ansteigt und frühestens im späten Jugendalter Erwachseneniveau erreicht. So können Kinder mit 3 Jahren ein Objekt (O'Hearn et al., 2010; O'Hearn et al., 2005), mit 6 bis 8 Jahren zwei Objekte, mit 10 bis 12 Jahren drei Objekte (Trick et al., 2009; Trick et al., 2005), mit 13 Jahren 3.5 Objekte und mit 16 Jahren 3.7 Objekte (Dye & Bavelier, 2010) verfolgen. Auch in Zählaufgaben (Jevons, 1871; vgl. Box 1.1) zeigte sich eine Zunahme der Aufmerksamkeitskapazität im Laufe der Kindheit und darüber hinaus. So beobachteten O'Hearn, Hoffman und Landau (2011) einen Anstieg der Subitizing-Spanne von drei auf vier Objekte zwischen 4 und 6.5 Jahren. Dieser Anstieg setzt sich gemäß Maylor, Watson und Hartley (2011) bzw. Trick, Audet und Dales (2003) zwischen 7 bzw. 8 Jahren und dem Erwachsenenalter stetig fort.

Schließlich sprechen Ergebnisse, die auf der Grundlage der Load-Theorie der Aufmerksamkeit (Lavie, 1995) gewonnen wurden, ebenfalls für eine Zunahme der

Aufmerksamkeitskapazität. So zeigten Huang-Pollock, Carr und Nigg (2002) in einem Load-Experiment (vgl. Box 1.1) mit neun- bis zehnjährigen Kindern und mit Erwachsenen, dass Kinder im Vergleich zu Erwachsenen bei einer geringeren perzeptuellen Load (vgl. Box 1.1) dazu übergehen, den Fokus der Aufmerksamkeit räumlich zusammenzuziehen und Distraktoren auszuschließen. Da gemäß der Load-Theorie dieses Verhalten dann zum Tragen kommt, wenn eine subjektiv hohe perzeptuelle Load dargeboten wird, deutet dies auf eine geringere Aufmerksamkeitskapazität der Kinder hin. Couperus (2011) bestätigte dieses Ergebnis und zeigte in einer mehr Altersgruppen umfassenden Stichprobe, dass für Kinder im Altersbereich von 7 bis 12 Jahren eine geringere Load zu einer Fokussierung der Aufmerksamkeit führte als bei Jugendlichen mit 13 bis 17 Jahren oder Erwachsenen.

In der Summe weisen die genannten Studien also darauf hin, dass die Verarbeitungskapazität im Kindes- und Jugendalter zunimmt. Studien, die erste Hinweise darauf liefern, dass diese Zunahme der Verarbeitungskapazität Auswirkungen auf die Fähigkeit zur Selektion haben könnte, werden im folgenden Abschnitt beschrieben.

### **2.8.3 Entwicklungsbezogene empirische Befunde zum Zusammenhang von Verarbeitungsressourcen und Präzision der Selektion**

Wie in Abschnitt 2.3 dargestellt, scheint die räumliche Präzision der Selektion durch die Menge der zur Verfügung stehenden Verarbeitungsressourcen beeinflusst zu werden. Da Kinder und Jugendliche, wie im letzten Kapitel erläutert, über weniger Verarbeitungsressourcen als Erwachsene verfügen, ist davon auszugehen, dass sie nicht in der Lage sind, ähnlich präzise wie Erwachsene zu selektieren, weil ihnen die nötigen Verarbeitungsressourcen fehlen. In diesem Abschnitt soll überprüft werden, inwieweit sich empirische Anhaltspunkte für diese Vermutung finden lassen.

Hinweise darauf, dass bei Kindern die Variation der Menge der Aufmerksamkeitsressourcen an einem Ort einen Einfluss auf die Selektionsfähigkeit hat, gibt die bereits oben erwähnte Studie von Akhtar und Enns (1989). In dieser Studie wurde die Aufmerksamkeitsmenge am Erscheinungsort des Zielreizes in einer Flankierreiz-Aufgabe manipuliert, indem ein exogener Hinweisreiz (vgl. Box 1.1) vorab entweder am Erscheinungsort des Zielreizes dargeboten wurde (hohe Menge Aufmerksamkeit am Erscheinungsort des Zielreizes) oder der Hinweisreiz an einem anderen Ort dargeboten wurde (geringe Menge Aufmerksamkeit) oder kein Hinweisreiz dargeboten wurde (mittlere Menge Aufmerksamkeit). Es zeigte sich, dass der Interferenzeffekt des Distraktors umso größer war, je weniger Aufmerksamkeit am Erscheinungsort des Zielreizes vorhanden war, und dass dieser Effekt umso stärker war, je jünger die Versuchspersonen waren. Dieses Ergebnis deutet darauf hin, dass die räumliche



Präzision der Selektion umso geringer war, je weniger Aufmerksamkeitsressourcen die Probanden der jeweiligen Altersgruppe zur Verfügung hatten. Umgekehrt zeigen die Ergebnisse bei validem Hinweisreiz aber auch, dass die Nachteile der jüngeren Altersgruppe kompensiert werden können und sogar die Jüngsten den Fokus ihrer Aufmerksamkeit auf 12 Winkelminuten zusammenziehen können, wenn die vorhandenen Verarbeitungsressourcen maximal gebündelt werden.

Einen weiteren Hinweis darauf, dass Kinder weniger präzise selektieren, da ihnen die nötigen Verarbeitungsressourcen fehlen, liefert auch die Studie von Cowan, AuBuchon, Zwilling und Gilchrist (2010), in der sich „Selektion“ jedoch nicht auf räumliche, sondern auf eigenschaftsbasierte Selektion, d.h. die Fähigkeit, Objekte anhand von Eigenschaften zu selektieren, bezieht. In dieser Studie boten Cowan et al. ihren Probanden (7 bis 8 und 12 bis 13 Jahre alten Kindern und Erwachsenen) in einer Variation der *Change-Detection-Aufgabe* von Luck und Vogel (1997) Anordnungen aus Objekten dar, die je zur Hälfte aus Kreisen und Dreiecken bestanden und unterschiedliche Farben hatten. Die Objekte wurden anschließend ausgeblendet und nach einem kurzen Interstimulusintervall wurde ein Testobjekt an einer Stelle dargeboten, an der vorher bereits ein Objekt derselben Form erschienen war. Die Probanden sollten nun angeben, ob das Testobjekt dieselbe Farbe wie das vorher dargebotene Objekt hatte, dieselbe Farbe wie ein anderes vorher dargebotenes Objekt derselben Form hatte oder ob diese Farb-Form-Kombination vorher nicht vorgekommen war. Zwischen Blöcken von Durchgängen wurde nun die Wahrscheinlichkeit variiert, mit der das Testobjekt in einer den Probanden vor dem Experiment zufällig zugeordneten Form (Kreis oder Dreieck) sein würde. Diese konnte 100 %, 80 % oder 50 % betragen und die Probanden wurden vor dem Block über die entsprechende Wahrscheinlichkeit informiert. Zusätzlich wurde die Anzahl der zu erinnernden Objekte zwischen zwei und drei variiert. Die älteren Kinder und die Erwachsenen waren sowohl bei zwei als auch bei drei zu erinnernden Objekten in der Lage, ihre Selektionsleistung strategisch an die jeweils aktuellen Wahrscheinlichkeiten anzupassen. Der jüngsten Altersgruppe gelang dies ebenfalls in der Bedingung mit zwei Objekten, jedoch nicht in der Bedingung mit drei Objekten. Bei geringer Arbeitsgedächtnislastung zeigten die jüngeren Kinder also ein mit älteren Kindern und Erwachsenen vergleichbares, an die Wahrscheinlichkeiten angepasstes Selektionsverhalten, bei höherer Arbeitsgedächtnislastung konnten sie dieses nicht aufrechterhalten. Die Autoren schließen daraus, dass die Selektionsleistung von Kindern der von Erwachsenen ähnlich ist, wenn die Arbeitsgedächtnislastung gering ist. Sie nehmen an, dass dies darauf zurückzuführen ist, dass die begrenzte Verarbeitungskapazität zwischen Speicherung und Selektion geteilt werden

muss und bei geringerer Verarbeitungskapazität nicht mehr ausreichend Ressourcen vorhanden sind, um optimal zu selektieren. Sie schließen daraus, dass die eigentliche Fähigkeit zur Selektion bereits erwachsenenähnlich ist, dass aber häufig bei Kindern die dafür nötigen Ressourcen fehlen.

Die genannten Studien deuten in der Summe darauf hin, dass die geringere Präzision der Selektion bei Kindern auf eine geringere Menge vorhandener Verarbeitungsressourcen zurückzuführen sein könnte. Hierin könnte ein erster möglicher Erklärungsansatz für die geringere Auflösung der Aufmerksamkeit von Kindern bestehen. Daneben lassen sich möglicherweise auf neuronaler Ebene Anhaltspunkte dafür finden lassen, warum sich die Auflösung der Aufmerksamkeit im Kindesalter verändert. Dieser Aspekt soll im nächsten Abschnitt thematisiert werden.

## **2.9 Neuronale Grundlagen der Entwicklung der Auflösung der Aufmerksamkeit**

Es gibt bisher keine Studien, die sich auf neuronaler Ebene gezielt mit der Frage auseinander gesetzt hätten, warum sich die Auflösung der Aufmerksamkeit im Laufe der Kindheit verändert bzw. inwieweit das Zusammenziehen des Fokus der Aufmerksamkeit im Kindes- und Erwachsenenalter mit unterschiedlichen neuronalen Korrelaten einhergeht. Nichtsdestotrotz soll hier versucht werden, sich der Frage nach den neuronalen Grundlagen der Entwicklung der Auflösung der Aufmerksamkeit bestmöglich anzunähern, um basierend auf diesen Informationen Hypothesen für die weitere Untersuchung generieren zu können. Hierzu sollen zunächst die Grundlagen der Hirnentwicklung dargestellt werden (2.9.1). Darauf aufbauend wird anschließend der aktuelle Forschungsstand zu den neuronalen Grundlagen der Entwicklung der Aufmerksamkeit erläutert (2.9.2). Es ist zu vermuten, dass die Befunde dieses Forschungsbereichs insofern Relevanz für die Auflösung der Aufmerksamkeit haben, als (so zumindest die aktuelle theoretische Vorstellung) es sich bei der Auflösung der Aufmerksamkeit um ein Aufmerksamkeitsphänomen handelt (vgl. 2.1.3) und als die neuronalen Korrelate, die mit Aufmerksamkeit im Allgemeinen und der Auflösung der Aufmerksamkeit im Besonderen in Verbindung gebracht werden, sich in hohem Grade überschneiden (vgl. 2.4.2). Dies betrifft hauptsächlich das fronto-parietale Aufmerksamkeitsnetzwerk (Corbetta & Shulman, 2002), auf das bei der Erläuterung der neuronalen Grundlagen der Entwicklung der Aufmerksamkeit der Fokus gelegt werden soll.

### 2.9.1 Grundlagen der Hirnentwicklung in Kindheit und Jugend

Die Entwicklung des Gehirns von der Geburt bis ins Erwachsenenalter ist ein dynamischer Prozess, zu dessen globaler Beschreibung im Allgemeinen das kortikale Gesamtvolumen herangezogen wird. Dieses steigt bis zum 6. Lebensjahr deutlich an, erreicht sein Maximum zum Beginn der Pubertät und verändert sich danach kaum noch (Giedd et al., 1999; Lenroot et al., 2007; Toga, Thompson & Sowell, 2006). Diesem globalen Entwicklungsverlauf liegt ein komplexes Muster von progressiven und regressiven Veränderungen zugrunde, welches sich in Bezug auf die graue und weiße Substanz unterscheidet. Im Hinblick auf die graue Substanz wurden speziell die Dichte und das Volumen untersucht. Beide Maße entwickeln sich in der Kindheit und Jugend im Sinne einer umgekehrten U-Funktion, d.h. sie steigen, über den gesamten Kortex betrachtet, bis zum Beginn der Pubertät an und fallen dann ab (Giedd et al., 1999; Gogtay et al., 2004; Lenroot et al., 2007; Sowell et al., 2003). Der Zeitpunkt der maximalen Dichte, welcher als Indikator des Reifungsfortschrittes verwendet wird, variiert in Abhängigkeit von der Hirnregion. Die maximale Dichte wird zuerst am primären sensumotorischen Kortex, dem superioren parietalen Kortex und den frontalen und okzipitalen Polen erreicht. Die Reifung des Frontalkortex verläuft danach vom sensumotorischen Kortex ausgehend von posterior nach anterior bzw. beim Parietalkortex vom gleichen Startpunkt ausgehend von anterior nach posterior. In beiden Regionen findet die Reifung von superior nach inferior statt. Zuletzt sinkt die Dichte der grauen Substanz in den Assoziationsarealen. So wird im präfrontalen und im inferioren parietalen Kortex die maximale Dichte mit 11 bis 12 Jahren und im temporalen Assoziationskortex mit 17 Jahren erreicht (Gogtay et al., 2004; für den genauen Entwicklungsverlauf der verschiedenen Regionen siehe Abbildung 2.3). Dieses regionsspezifische Muster findet sich in ähnlicher Weise in der Entwicklung des Volumens der verschiedenen Hirnregionen (Giedd et al., 1999) und wurde in einer weiteren Studie mit kortikaler Dicke als Maß bestätigt (Sowell et al., 2004).

Das Muster aus Zu- und Abnahme der grauen Substanz spiegelt sich in den Ergebnissen von Post-Mortem-Untersuchungen wider, welche die Dichte der Synapsen im neuronalen Gewebe untersuchen. Diese Studien zeigen, dass es ab kurz vor der Geburt bis zum Alter von 1 bis 2 Jahren über den gesamten Kortex hinweg zu einer massenhaften und redundanten Bildung von Synapsen kommt (Huttenlocher, de Courten, Garey & van der Loos, 1982; Rakic, Bourgeois, Eckenhoff, Zecevic & Goldman-Rakic, 1986). Diese hohe Dichte wird in den meisten Arealen während der Kindheit aufrechterhalten, bis es ab dem Beginn der Pubertät zu einer weitreichenden Elimination von Synapsen (*Pruning*), kommt, die sich bis in das

Erwachsenenalter hinzieht (Huttenlocher, 1990; Rakic et al., 1986). Wie in den MRT-Studien wurden auch in den histologischen Untersuchungen regionale Unterschiede bezüglich der Zeitpunkte gefunden, zu denen die Elimination der Synapsen stattfindet (Bourgeois, Goldman-Rakic & Rakic, 1994; Huttenlocher & Dabholkar, 1997). Es wird angenommen, dass die Elimination der Synapsen die zelluläre Grundlage des mit MRT beobachteten Rückgangs in Volumen und Dichte ist und dass sie eine effizientere Informationsübertragung auch über weit entfernte Regionen des Kortex mit sich bringt (O'Hare & Sowell, 2008).

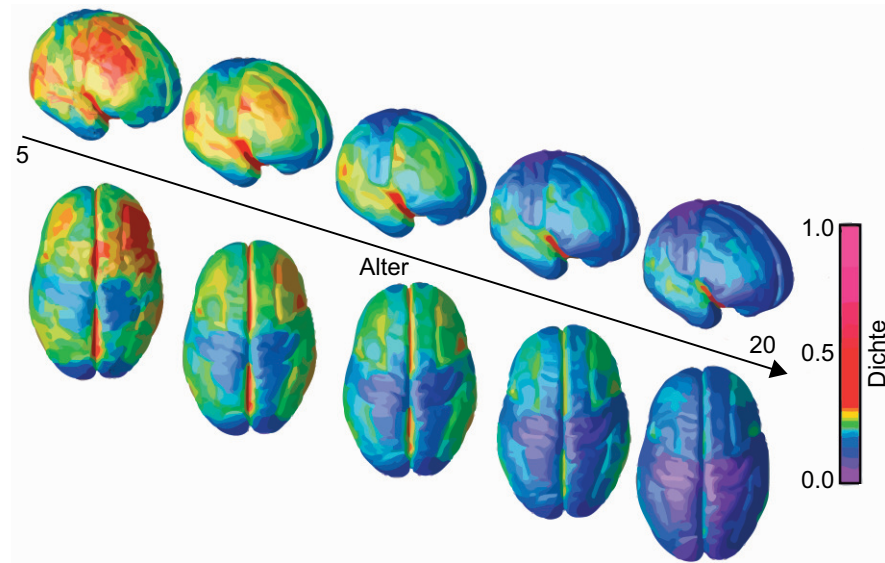


Abbildung 2.3: Entwicklung der Dichte der grauen Substanz zwischen 5 und 20 Jahren (aus Gogtay et al., 2004).

Die Reifung der weißen Substanz folgt einem anderen Entwicklungsmuster als die Reifung der grauen Substanz. Ihr Volumen und verschiedene Maße der Mikrostruktur, die mit *Diffusions-Tensor-Bildgebung* (*diffusion tensor imaging*; DTI) ermittelt wurden, nehmen von der Geburt bis ins Erwachsenenalter stetig zu (Barnea-Goraly, 2005; Giedd et al., 1999; Lenroot et al., 2007; Sowell et al., 2003). Es wird angenommen, dass diese Veränderung Zunahmen in der Myelinisierung und der Dicke der Axone widerspiegelt (Giedd, 2004) und eine schnellere und zuverlässigere neuronale Signalweiterleitung ermöglicht (Giedd & Rapoport, 2010). Wie bei der grauen Substanz zeigen auch die Veränderungen der weißen Substanz regionale Unterschiede im zeitlichen Verlauf. Gemäß histologischer Post-Mortem-Studien verläuft die Myelinisierung prinzipiell von inferioren zu superioren Hirnarealen und dies tendenziell von posterior nach anterior (Flechsig, 1920; Lebel, Walker, Leemans, Phillips & Beaulieu, 2008). DTI-Studien zeigen, dass von den großen Faserbündeln zuerst die *Projektionsfasern* (d.h. auf- und absteigende Fasersysteme, die subkortikale mit kortikalen Regionen verbinden; Kahle & Frotscher, 2009), dann die *Kommissurenfasern* (d.h. Fasern, die

die Hemisphären verbinden) und zuletzt die *Assoziationsfasern* (Fasern, die Kortextareale derselben Hemisphäre verbinden) myelinisiert werden (Schmithorst & Yuan, 2010). Mit dieser strukturellen Entwicklung gehen auch Veränderungen der funktionellen Verknüpfung der Hirnareale einher. Ein allgemeiner Trend ist hierbei, dass die funktionellen Netzwerke jüngerer Kinder eher anatomisch lokal sind, während Erwachsene eher funktionelle Netzwerke aufweisen, die sich aus weiter auseinanderliegenden Regionen zusammensetzen (Fair et al., 2009; Fair et al., 2007; Supekar, Musen & Menon, 2009).

Die eben beschriebenen strukturellen Veränderungen im Laufe von Kindheit und Jugendalter werden im Allgemeinen als Grundlage von Verbesserungen in kognitiven Leistungen angesehen und teilweise wurde dies empirisch überprüft (siehe z.B. Bunge & Wright, 2007; Tamnes et al., 2010). Die neuronalen Grundlagen der sich im Laufe der Entwicklung verbessernden Aufmerksamkeitsleistungen wurden bisher vorwiegend (aber nicht ausschließlich) aus funktioneller Perspektive untersucht. Der diesbezügliche derzeitige Wissenstand soll – mit besonderem Augenmerk auf das fronto-parietale Aufmerksamkeitsnetzwerk – im nächsten Abschnitt beschrieben werden.

### **2.9.2 Neuronale Grundlagen der Entwicklung der Aufmerksamkeit**

Es gibt bisher nur wenige Entwicklungsstudien, die sich mit den neuronalen Grundlagen der Entwicklung der selektiven visuellen Aufmerksamkeit beschäftigen. Studien zu den neuronalen Grundlagen der Entwicklung der *endogenen* Aufmerksamkeit (Beaton et al., 2010; Booth et al., 2003; Wendelken, Baym, Gazzaley & Bunge, 2011) deuten darauf hin, dass bereits achtjährige Kinder sowohl das fronto-parietale Aufmerksamkeitsnetzwerk rekrutieren als auch Modulationen in visuellen Arealen aufweisen. Uneinigkeit herrscht jedoch darüber, ob die Stärke der Aktivierung bei Erwachsenen und Kindern vergleichbar ist. Während Booth et al. (2003) sowohl in den neuronalen Quell- als auch den Zielregionen der Aufmerksamkeitsausrichtung (vgl. 2.4.1) größtenteils ähnliche Aktivierungsstärken bei Kindern und Erwachsenen während einer visuellen Suchaufgabe beobachteten, fanden Wendelken et al. (2011) bei Kindern eine geringere Aktivierung sowohl in einer Zielregion der Aufmerksamkeitszuwendung (temporaler Kortex) als auch im dorsolateralen präfrontalen Kortex (DLPFC). Dieses Areal ist zwar nicht klassischerweise Bestandteil des fronto-parietalen Aufmerksamkeitsnetzwerkes (Corbetta & Shulman, 2002), wird jedoch teilweise als assoziierte Struktur betrachtet, die an der Kontrolle der Aufmerksamkeitsausrichtung beteiligt ist (Desimone & Duncan, 1995). Ein ähnliches Ergebnis erbrachte eine Entwicklungsstudie zur Distraktorinhibition (Olesen et al., 2006), in der ebenfalls eine Aktivierungszunahme im DLPFC zwischen 13 Jahren und dem Erwachsenenalter beobachtet

wurde. Hinzu kam in dieser Studie jedoch gleichzeitig ein Aktivierungsrückgang in den FEF. Die Autoren deuten die Ergebnisse dahingehend, dass die zusätzliche DLPFC-Aktivierung den Erwachsenen hilft, eine distraktorresistente Repräsentation aufzubauen, während die höhere FEF-Aktivierung ihrer Meinung nach darauf hinweist, dass die Dreizehnjährigen zusätzlich Informationen verarbeiten, die sie eigentlich unterdrücken sollten. Auch in Studien zur *exogenen* Aufmerksamkeitsausrichtung (Konrad et al., 2005; Rubia, Hyde, Halari, Giampietro & Smith, 2010) rekrutierten die Kinder während der Aufmerksamkeitszuwendung ähnliche Netzwerke wie die Erwachsenen. Bei Kindern waren diese Aktivierungen jedoch schwächer und es wurden zusätzliche Regionen außerhalb der typischen Aufmerksamkeitsnetzwerke aktiviert.

Die Entwicklung des fronto-parietalen Netzwerkes wurde in größerem Umfang in Studien zur Entwicklung des visuell-räumlichen Kurzzeit- bzw. Arbeitsgedächtnisses (vgl. 2.1.2) untersucht. Diese Studien zeigen ebenfalls, dass bereits Kinder und Jugendliche in visuell-räumlichen Kurzzeit- und Arbeitsgedächtnisaufgaben das fronto-parietale Netzwerk aktivieren (Geier, Garver, Terwilliger & Luna, 2009; Klingberg, Forssberg & Westerberg, 2002; Kwon, Reiss & Menon, 2002; Nelson et al., 2000; Olesen et al., 2006; Olesen, Nagy, Westerberg & Klingberg, 2003; Scherf, Sweeney & Luna, 2006; Schweinsburg, Nagel & Tapert, 2005; Thomas et al., 1999; Thomason et al., 2009). Darüber hinaus wurde in diesen Studien ein Anstieg der Aktivierungen in frontalen und parietalen Regionen mit zunehmendem Alter beobachtet (Klingberg et al., 2002; Kwon et al., 2002; Olesen et al., 2006; Olesen et al., 2003; Scherf et al., 2006; Schweinsburg et al., 2005; Thomason et al., 2009) und eine höhere Aktivierung innerhalb dieses Netzwerkes wurde mit der Verbesserung der Leistung der Kinder in Kurzzeit- und Arbeitsgedächtnisaufgaben in Verbindung gebracht (Klingberg et al., 2002; Nagel, Barlett, Schweinsburg & Tapert, 2005). Thomason et al. (2009) zeigten zudem, dass ein Anstieg in der Anzahl der in einer visuell-räumlichen Kurzzeitgedächtnisaufgabe zu memorierenden Objekte bei Kindern mit einem geringeren Anstieg der Aktivität im fronto-parietalen Netzwerk einhergeht als bei Erwachsenen (siehe jedoch Jolles, Kleibeuker, Rombouts & Crone, 2011, die keine Unterschiede im Anstieg der Aktivierung mit zunehmender Load zwischen Kindern und Erwachsenen finden konnten).

Die eben beschriebenen Studien deuten darauf hin, dass die Entwicklung von Aufmerksamkeit und Arbeitsgedächtnis mit Veränderungen in Aktivierungsstärken und Aktivierungsmustern im fronto-parietalen Netzwerk einhergehen. Zwei Studien von Klingberg und Kollegen (Nagy, Westerberg & Klingberg, 2004; Olesen et al., 2003) konnten darüber hinaus zeigen, dass diese Veränderungen mit strukturellen Entwicklungen

einhergehen. Olesen et al. (2003) untersuchten den Zusammenhang zwischen der Leistung in einer visuell-räumlichen Kurzzeitgedächtnisaufgabe, der BOLD-Response und der Myelinisierung in bestimmten, vorher festgelegten Regionen des Gehirns und konnten zeigen, dass die strukturelle Konnektivität zwischen frontalen und parietalen Arealen mit der Höhe der BOLD-Response in beiden Arealen und zusätzlich mit der Leistung in der Kurzzeitgedächtnisaufgabe korrelierte. Nagy et al. (2004) zeigten, dass eine höhere Kurzzeitgedächtnisspanne mit zunehmendem Alter positiv mit der Myelinisierung einer Region zwischen dem superioren frontalen Sulcus und dem intraparietalen Sulcus korrelierte. Auch wenn diese Ergebnisse keine Kausalität aufzeigen, werten die Autoren sie als Hinweis darauf, dass Verbesserungen in Kurzzeitgedächtnisleistungen eng mit der Entwicklung der grauen und weißen Substanz verknüpft sind.

Die genannten Studien weisen in der Summe darauf hin, dass Kinder bereits in der mittleren Kindheit das fronto-parietale Netzwerk rekrutieren, um Aufgaben, die die Zuwendung von Aufmerksamkeit oder das Aufrechterhalten von visuell-räumlichen Informationen im Kurzzeit- bzw. Arbeitsgedächtnis erfordern, zu erfüllen. Gleichzeitig sind jedoch sowohl quantitative als auch qualitative Unterschiede in den Aktivierungen der Kinder bei diesen Aufgaben zu beobachten. Studien zu den neuronalen Grundlagen der Entwicklung des Arbeitsgedächtnisses zeigen zudem, dass die Leistungsveränderungen und Veränderungen in der Höhe der Aktivierungen von strukturellen Veränderungen im fronto-parietalen Netzwerk begleitet werden. Es wäre denkbar, dass die bei Kindern abweichende neuronale Aktivität und Struktur des fronto-parietalen Netzwerkes auch die Grundlage der von Erwachsenen abweichenden Auflösung der Aufmerksamkeit darstellt. Diese Hypothese ist bisher jedoch nicht überprüft.

## **2.10 Zusammenfassung**

Die Auflösung der Aufmerksamkeit (Intriligator & Cavanagh, 2001), d.h. die kleinstmögliche Ausdehnung der Selektionsregion der Aufmerksamkeit, ist bei Erwachsenen gut untersucht. Zudem hat sich mit verschiedenen Paradigmen gezeigt, dass die Selektion einer sehr kleinen Fläche, also das Zusammenziehen der Selektionsregion, ressourcenaufwendig ist (z.B. Alvarez & Franconeri, 2007; Howard & Holcombe, 2008). Gut untersucht sind ebenfalls die neuronalen Korrelate der visuell-räumlichen Aufmerksamkeit. Es wird vermutet, dass das Netzwerk, das die visuell-räumliche Aufmerksamkeit kontrolliert, auch das räumliche Ausmaß der Selektionsregion bestimmt (Cavanagh & He, 2011; Intriligator & Cavanagh, 2001; Stevens & Bavelier, 2012), jedoch wurde diese Vermutung bisher nicht weiter

untersucht. Eine erste Studie zur Kontrolle der raum-zeitlichen Präzision der Aufmerksamkeitsausrichtung (Shim et al., 2009) deutet darauf hin, dass tatsächlich eine Subkomponente des fronto-parietalen Netzwerkes, die FEF, an der Herstellung der höheren Präzision beteiligt ist. Es ist jedoch unklar, ob sich dieser Befund auch auf räumliche Präzision übertragen lässt.

Bei Kindern sind bisher verschiedene Aspekte der visuell-räumlichen Aufmerksamkeit untersucht worden. Diese Studien zeigen, dass Kinder prinzipiell bereits früh in der Lage sind, Informationen räumlich zu selektieren, dass sich jedoch gleichzeitig bis ins Kindes- oder Jugendalter die Selektionsleistung noch verbessert und die Ausrichtung der Aufmerksamkeit schneller, flexibler und stärker willentlich gesteuert wird (z.B. Scerif, 2010). Nicht dezidiert untersucht wurde bisher die Entwicklung der Auflösung der Aufmerksamkeit. Erste Befunde bezüglich der Fähigkeit, die Größe der Selektionsregion einzuschränken, liefern Studien mit dem Flankierreiz- (Enns & Girgus, 1985; Pastò & Burack, 1997) und dem Crowding-Paradigma (Bondarko & Semenov, 2005; Jeon et al., 2010; Semenov et al., 2000). Sie zeigen, dass die Selektionsregion im Laufe der Kindheit enger zusammengezogen werden kann, zeichnen jedoch ein uneinheitliches Bild des Entwicklungsverlaufs. Zudem ist aus konzeptioneller Sicht unklar, ob die mit diesen Herangehensweisen ermittelten Maße tatsächlich die Genauigkeit der *Selektion* untersuchen, da in diesen Studien komplexe Reize verwendet werden, die für eine erfolgreiche Erfüllung der Aufgabe eine über die reine Selektion oder Individuation hinausgehende Verarbeitung der Reize erfordern. Es kann somit geschlossen werden, dass es bisher keine Studie gibt, die eindeutig die Entwicklung der Genauigkeitsbegrenzung der Aufmerksamkeit untersuchen würde.

Ein möglicher Erklärungsansatz für eine im Kindesalter zunehmende Auflösung der Aufmerksamkeit könnte sein, dass Kinder weniger genau selektieren können, weil ihnen nicht genug Verarbeitungsressourcen zur Verfügung stehen, um die geringe Ausdehnung der Selektionsregion zu erreichen, die der von Erwachsenen entspricht. Diese Vermutung verknüpft die mittlerweile gut gesicherte Erkenntnis, dass die Menge der zur Verfügung stehenden Verarbeitungsressourcen im Laufe der Kindheit und des Jugendalters zunimmt (z.B. Cowan & Alloway, 2009) mit dem aus der Erwachsenenforschung resultierenden Befund, dass das Zusammenziehen des Fokus der Aufmerksamkeit in hohem Grade Verarbeitungsressourcen verbraucht (z.B. Howard & Holcombe, 2008). Erste Hinweise darauf, dass die Präzision der Verarbeitung von Kindern geringer ist, da sie über eine geringere Menge an Verarbeitungsressourcen verfügen, liefert die Studie von Akhtar und Enns (1989). Sie zeigt, dass Kinder besonders empfindlich auf Manipulationen der



räumlichen Verteilung von Verarbeitungsressourcen reagieren. Dies ist vermutlich dadurch bedingt, dass Kinder insgesamt weniger Ressourcen zu verteilen haben. Der Versuchsaufbau von Akhtar und Enns lässt jedoch nur sehr begrenzte Schlüsse hinsichtlich der Veränderung des räumlichen Profils der Aufmerksamkeit durch eine Manipulation der Menge der vorhandenen Ressourcen zu, da nur *ein* Zielreiz-Distraktor-Abstand getestet wurde. In einer weiteren Entwicklungsstudie, die den Zusammenhang von Verarbeitungsressourcen und Genauigkeit der Selektion untersucht, zeigen Cowan et al. (2010), dass die Genauigkeit der eigenschaftsbasierten Selektion bei Kindern abnimmt, wenn die Menge der Informationen, die gleichzeitig im Arbeitsgedächtnis gespeichert werden müssen, zunimmt, und dass dieser Effekt bei Kindern bereits bei weniger zu merkenden Informationen eintritt. Die in der Studie von Cowan et al. untersuchten Konstrukte – eigenschaftsbasierte Selektion und Arbeitsgedächtnis – ähneln den hier interessierenden Konstrukten, räumlicher Selektion und Aufmerksamkeit, sind jedoch nicht damit identisch. Ob sich die Schlüsse der Studie von Cowan et al. auf den hier im Fokus des Interesses stehenden Zusammenhang von räumlicher Selektion und Aufmerksamkeit übertragen lassen, ist unklar. Es lässt sich also schließen, dass der Zusammenhang zwischen der räumlichen Präzision der Selektion und der Menge der zur Verfügung stehenden Aufmerksamkeitsressourcen bisher noch nicht gezielt aus einer Entwicklungsperspektive untersucht worden ist.

Studien zur strukturellen und funktionellen Entwicklung des Gehirns zeigen, dass dieses bis ins Erwachsenenalter erhebliche Veränderungen durchläuft (z.B. Giedd & Rapoport, 2010). Diese Veränderungen betreffen auch das fronto-parietale Aufmerksamkeitsnetzwerk. Letzteres wird bei Aufgaben zur selektiven Aufmerksamkeit und zum Arbeitsgedächtnis bereits im Kindesalter aktiviert, diese Aktivierung weicht jedoch sowohl in Bezug auf ihre Stärke als auch auf ihre Ausdehnung von Erwachsenen ab (Beaton et al., 2010; Booth et al., 2003; Thomason et al., 2009; Wendelken et al., 2011). Die bisher durchgeführten Studien befassen sich jedoch eher mit allgemeinen Aspekten von Aufmerksamkeit und setzten sich nicht mit der Frage auseinander, inwieweit eine veränderte Rekrutierung des fronto-parietalen Netzwerkes für eine Entwicklung der Auflösung der Aufmerksamkeit verantwortlich sein könnte. Somit gibt es also bisher keine Studien, die sich auf neuronaler Ebene gezielt mit den der Auflösung der Aufmerksamkeit zugrunde liegenden Mechanismen auseinandergesetzt hätten oder die Frage in Angriff genommen hätten, inwieweit das Zusammenziehen des Fokus der Aufmerksamkeit im Kindes- und Erwachsenenalter mit unterschiedlichen neuronalen Korrelaten einhergeht.

### 3 Fragestellung und Hypothesen

Mit der vorliegenden Arbeit sollte die Entwicklung der Auflösung der Aufmerksamkeit und mögliche dieser Entwicklung zugrunde liegende Bedingungen untersucht werden. Hierzu wurden drei querschnittlich angelegte Untersuchungen – zwei Verhaltensstudien und eine fMRT-Untersuchung – durchgeführt, in denen jeweils die Auflösung der Aufmerksamkeit mit dem Object-Tracking-Paradigma (Pylyshyn & Storm, 1988) beleuchtet wurde.

In **Experiment 1** wurde untersucht, ob es zwischen mittlerem Kindesalter und frühem Jugendalter eine Entwicklung in der Auflösung der Aufmerksamkeit gibt und wie sich diese charakterisieren lässt. Gibt es eine Entwicklung, wie stark ist sie, in welchem Altersbereich ist die Entwicklung mehr oder weniger stark ausgeprägt? Zur Untersuchung dieser Fragestellung wurde im Object-Tracking-Paradigma der Abstand zwischen Zielreiz und Distraktoren variiert und untersucht, welche Auswirkung diese Variation auf die Trackingleistung von Kindern und Jugendlichen zwischen 7 und 13 Jahren und Erwachsenen hat. Zielsetzung war eine präzise Bestimmung der Auflösung der Aufmerksamkeit für die verschiedenen Altersgruppen, sodass diese verglichen werden können und eine detaillierte Beschreibung des Entwicklungsverlaufs möglich wird. Die bisherigen Studien, die verwandte Phänomene untersuchten (z.B. Enns & Girgus, 1985; Jeon et al., 2010; vgl. 2.7), sagen keinen eindeutigen Entwicklungstrend vorher. In Bezug auf die dort skizzierten Entwicklungsverläufe ist die einzige Gemeinsamkeit, dass nach der Kindheit noch eine Zunahme in der Präzision der Verarbeitung eng platzierter Objekte zu beobachten ist. Daher wird hier eher allgemein formuliert:

**Hypothese 1:** Die Auflösung der Aufmerksamkeit nimmt mit steigendem Alter zu.

Neben der Beantwortung der Frage nach der Entwicklung der Auflösung der Aufmerksamkeit sollte abgesichert werden, dass die im Tracking-Experiment beobachteten Unterschiede nicht auf Entwicklungsveränderungen in visuellen Fähigkeiten, die der Auflösung der Aufmerksamkeit möglicherweise zugrunde liegen, zurückzuführen sind. Ein naheliegender Kandidat, um entwicklungsbedingte Veränderungen in der hier verwendeten Aufgabe zur Auflösung der Aufmerksamkeit zu erklären, ist die dynamische Sehschärfe (Ludvig, 1948; vgl. 2.2.1). Um die Entwicklungsverläufe der Auflösung der Aufmerksamkeit und der dynamischen Sehschärfe vergleichen und möglicherweise dissoziieren zu können, wurde daher für alle Altersgruppen die dynamische Sehschärfe ermittelt. Hierzu wurde ein dynamisches Lücken-Detektions-Experiment mit variierendem Abstand zwischen einem

statischen und einem dynamischen Punkt verwendet. Mit diesem Versuchsaufbau sollte der kleinste Abstand ermittelt werden, bei dem die Versuchspersonen noch eine Lücke zwischen den beiden Punkten erkennen und die Punkte somit visuell auflösen konnten. Frühere Untersuchungen zur Entwicklung der dynamischen Sehschärfe zeichnen ein gemischtes Bild. Teilweise wurde eine erwachsenenähnliche dynamische Sehschärfe mit 6 Jahren beobachtet (Giaschi & Regan, 1997), teilweise eine Entwicklung, die sich bis zum 15. Lebensjahr hinzieht (Ishigaki & Miyao, 1994; Schrauf, Wist & Ehrenstein, 1999). Hier soll, auf der Grundlage der Studie von Giaschi und Regan, die der vorliegenden Studie hinsichtlich des verwendeten Stimulusmaterials am ehesten ähnelt, und welche eine erwachsenenähnliche dynamische Sehschärfe ab 6 Jahren beobachtete, folgende Hypothese formuliert werden:

**Hypothese 2:** Alle Altersstufen weisen die gleiche dynamische Sehschärfe auf.

Mit dem zweiten und dritten Experiment sollten die Mechanismen, die der sich entwickelnden Auflösung der Aufmerksamkeit zugrunde liegen, in einer ersten Annäherung untersucht werden. In **Experiment 2** wurde dieser Frage auf Verhaltensebene nachgegangen. In Erwachsenenstudien konnte gezeigt werden, dass die Auflösung der Aufmerksamkeit von der Menge der kognitiven Ressourcen abhängt, die zur Verarbeitung eines einzelnen Objektes zu einem Zeitpunkt zur Verfügung stehen (z.B. Howard & Holcombe, 2008; vgl. 2.3). Da, wie in vielen Studien zur Entwicklung der Verarbeitungskapazität (z.B. Gathercole et al., 2004; Pascual-Leone, 1970; Trick et al., 2005) gezeigt wurde (vgl. 2.8.2), Kinder eine geringere Verarbeitungskapazität als Erwachsene aufweisen, ist eine mögliche Ursache der sich entwickelnden Auflösung der Aufmerksamkeit der entwicklungsbedingte Zuwachs an Ressourcen, der darin resultiert, dass jedem Objekt mit zunehmendem Alter mehr Ressourcen zur Verfügung stehen und damit (durch engeres Zusammenziehen der Selektionsregion) eine zunehmende Auflösung der Aufmerksamkeit möglich wird. Diese Möglichkeit sollte mit dem zweiten Experiment untersucht werden. Es sollte somit der Frage nachgegangen werden, ob die sich entwickelnde Auflösung der Aufmerksamkeit mit der Zunahme der Verarbeitungsressourcen im gleichen Alterszeitraum erklärt werden kann. Zur Untersuchung der Fragestellung wurde der Effekt einer Variation der Menge der gleichzeitig zu beachtenden Informationen (Load) auf die Auflösung der Aufmerksamkeit in denselben Altersgruppen wie in Experiment 1 untersucht. Hierzu wurde im Objekt-Tracking-Paradigma zusätzlich zum Zielreiz-Distraktor-Abstand die Anzahl der zu verfolgenden Zielreize variiert. Dieser Manipulation lag die Absicht zugrunde, die Menge der pro verfolgtem Zielreiz zur Verfügung stehenden Ressourcen zu variieren, um damit einhergehende Effekte auf die Größe der

Selektionsregion untersuchen zu können. Es wurde angenommen, dass, wenn die Auflösung der Aufmerksamkeit bei Kindern geringer ist, weil sie weniger Ressourcen für das Zusammenziehen des Fokus der Aufmerksamkeit zur Verfügung haben, die Begrenzungen der pro Objekt zur Verfügung stehenden Ressourcen in Form einer geringeren Auflösung der Aufmerksamkeit umso eher zutage treten, je mehr Objekte mit Aufmerksamkeit zu belegen sind. Dem entsprechend wurde vermutet, dass Altersgruppen, die in Experiment 1 eine geringere Auflösung der Aufmerksamkeit hatten, in Experiment 2 einen höheren Anstieg des kritischen Abstandes bei zunehmender Zielreizanzahl aufweisen würden. Für eine eindeutige Bestätigung der Hypothese, dass die Entwicklung der Auflösung der Aufmerksamkeit auf eine Zunahme der Verarbeitungsressourcen zurückgeführt werden kann, sollte der Anstieg des kritischen Abstandes mit zunehmender Zielreizzahl den Entwicklungsverlauf der Auflösung der Aufmerksamkeit aus Experiment 1 nachbilden, d.h. bei Kindern bzw. Jugendlichen höher sein als bei Erwachsenen, und innerhalb der Kinderstichprobe bei jüngeren Kindern tendenziell noch einmal höher sein als bei älteren Kindern (für den genauen Verlauf siehe 4.2.1). Es resultiert folgende Hypothese (die in 5.1.1 und 5.1.2 noch weiter konkretisiert wird):

**Hypothese 3:** Die Veränderung der Auflösung der Aufmerksamkeit mit zunehmender Load bildet die (in Experiment 1 ermittelte) Auflösung der Aufmerksamkeit für die entsprechende Altersgruppe ab.

Zusätzlich sollte mit einem anderen methodischen Ansatz untersucht werden, ob es einen Zusammenhang zwischen der Auflösung der Aufmerksamkeit und der Verarbeitungskapazität gibt. Hierzu wurde mit einem *Individual-Differences*-Zugang (z.B. Shah & Miyake, 1996) untersucht, ob die individuelle Veränderung der Auflösung der Aufmerksamkeit mit zunehmender Zielreizanzahl mit der individuellen Verarbeitungskapazität, die hier als Kapazität des visuell-räumlichen Arbeitsgedächtnisses spezifiziert wurde (vgl. 2.1.2), korreliert. Ein solcher Zusammenhang auf individueller Ebene würde die Vermutung untermauern, dass es einen Zusammenhang zwischen der Auflösung der Aufmerksamkeit und Verarbeitungsressourcen gibt. Zur weiteren Bestätigung dieser Verknüpfung wurde zudem der individuelle Zusammenhang zwischen der Auflösung der Aufmerksamkeit und dem mit dem Arbeitsgedächtnis eng verwandten Konstrukt des Kurzzeitgedächtnisses (vgl. 2.1.2) untersucht. Dem lag die Idee zugrunde, dass es einen hohen Grad der Überschneidung zwischen Arbeits- und Kurzzeitgedächtnis gibt, und somit möglicherweise auch die Korrelation zwischen Kurzzeitgedächtnis und Auflösung der Aufmerksamkeit Aufschluss

über einen Zusammenhang zwischen Verarbeitungskapazität und Auflösung der Aufmerksamkeit liefern kann. Da gemäß der generellen Grundannahme ein starker Anstieg der Auflösung der Aufmerksamkeit mit zunehmender Zielreizanzahl mit geringen Kapazitätswerten einhergehen sollte, wurde sowohl hinsichtlich des Arbeits- als auch des Kurzzeitgedächtnisses ein negativer Zusammenhang mit der Veränderung der Auflösung der Aufmerksamkeit von zwei zu drei Zielreizen erwartet. Die entsprechenden Hypothesen lauten:

**Hypothese 4:** Die Veränderung der Auflösung der Aufmerksamkeit mit zunehmender Zielreizanzahl steht in negativem Zusammenhang zur Kapazität des visuell-räumlichen Arbeitsgedächtnisses.

**Hypothese 5:** Die Veränderung der Auflösung der Aufmerksamkeit mit zunehmender Zielreizanzahl steht in negativem Zusammenhang zur Kapazität des visuell-räumlichen Kurzzeitgedächtnisses.

Schließlich sollte in **Experiment 3** in einer ersten Annäherung der Frage nachgegangen werden, welche neurokognitiven Mechanismen der sich entwickelnden Auflösung der Aufmerksamkeit zugrunde liegen. Hierzu wurde mit fMRT die neuronale Aktivierung während einer (Single-)Object-Tracking-Aufgabe mit variierendem Zielreiz-Distraktor-Abstand in verschiedenen Altersgruppen gemessen und die Höhe und Verteilung der Aktivierungen zwischen den Altersgruppen verglichen. Auf Verhaltensebene wurde in Anlehnung an die Ergebnisse aus Experiment 1 das folgende Leistungsmuster in der Object-Tracking-Aufgabe erwartet:

**Hypothese 6:** Kinder sind bei großen Zielreiz-Distraktor-Abständen in der Lage, so gut wie Erwachsene ein Objekt mit Aufmerksamkeit zu verfolgen.

**Hypothese 7:** Über alle Zielreiz-Distraktor-Abstände hinweg steigt die Leistung in der Object-Tracking-Aufgabe mit zunehmendem Alter.

Auf neuronaler Ebene ist zu vermuten, dass die Veränderungen, die der sich entwickelnden Auflösung der Aufmerksamkeit zugrunde liegen, im fronto-parietalen Aufmerksamkeitsnetzwerk zu finden sind. Diese Hypothese basiert erstens auf dem mehrfach vorgebrachten Vorschlag, dass dieses Netzwerk die Größe des Aufmerksamkeitsfokus kontrolliert (Cavanagh & He, 2011; Intriligator & Cavanagh, 2001; Stevens & Bavelier, 2012) und zweitens auf den Ergebnissen der Studie von Shim et al. (2009), die darauf hindeutet, dass erhöhte Anforderungen an die Präzision der Selektion mit stärkeren

Kontrollsignalen aus diesem Netzwerk einhergehen. Möglicherweise sind Kinder aufgrund der in diversen Studien belegten verzögerten Entwicklung des fronto-parietalen Netzwerkes (z.B. Klingberg et al., 2002; Thomason et al., 2009) nicht in der Lage, dieselbe Anpassung der Stärke der Kontrollsignale an die jeweiligen Präzisionsanforderungen vorzunehmen. Die von ihnen generierten Signale sind möglicherweise zu schwach oder zu unspezifisch, um die erforderliche Modulation des visuellen Systems zu veranlassen. Im dritten Experiment sollte nun geklärt werden, inwieweit die geringere Auflösung der Aufmerksamkeit bei Kindern sich durch geringere regionale Aktivierung des fronto-parietalen Netzwerkes bei Kindern erklären lässt.

Die Fragestellung wurde in drei Schritten bearbeitet. In einem ersten Schritt sollte zunächst zur Klärung der Ausgangsbedingungen (vgl. Hager, Spies & Heise, 2001) die bisher nicht eindeutig geklärte Frage beantwortet werden, inwieweit Kinder und Erwachsene beim Verfolgen von Objekten dieselben Areale in derselben Stärke aktivieren. Die Studie von Beaton et al. (2010), bei der jedoch ein breites Altersspektrum ohne weitere Differenzierung untersucht und keine Erwachsenenstichprobe zum Vergleich herangezogen wurde, legt nahe, dass Kinder und Jugendliche beim Verfolgen von Objekten ähnliche Areale wie Erwachsene (z.B. Howe et al., 2009; vgl. 2.4.1) aktivieren, dass ihre Aktivierungen jedoch schwächer und diffuser sind. Auch fMRT-Studien zur Entwicklung des visuell-räumlichen Arbeitsgedächtnisses weisen auf geringere Aktivierungen in den frontalen und parietalen Anteilen des Netzwerkes bei Kindern und Jugendlichen hin (z.B. Klingberg et al., 2002; Thomason et al., 2009; vgl. 2.9.2). Desgleichen lassen Studien zur strukturellen Hirnentwicklung veränderte Aktivierungen in den relevanten frontalen und parietalen Arealen erwarten, da dort (z.B. Giedd et al., 1999; Gogtay et al., 2004; vgl. 2.9.1) und in den benachbarten Gebieten der weißen Substanz (z.B. Flechsig, 1920; Lebel et al., 2008) im mittleren und späteren Kindesalter noch deutliche Entwicklungsveränderungen stattfinden. Eine Studie zur Entwicklung der Bewegungsverarbeitung von Klaver, Lichtensteiger, Bucher, Dietrich, Loenneker und Martin (2008) zeigt zudem verringerte Aktivierungen von sechsjährigen Kindern im Bewegungsareal MT während der Beobachtung sich bewegender Objekte. Dies lässt vermuten, dass auch in der vorliegenden Studie die Aktivierung im Bewegungsareal MT in den Kinderstichproben im Vergleich zu der Erwachsenenstichprobe geringer ausfallen wird. Zusammenfassend ergeben sich die beiden folgenden Hypothesen:

**Hypothese 8:** Über alle Altersgruppen hinweg zeigt sich beim Verfolgen von Objekten eine erhöhte neuronale Aktivität im Tracking-Netzwerk aus FEF, PCC und MT.

**Hypothese 9:** Kinder aktivieren beim Verfolgen von Objekten das Tracking-Netzwerk in geringerer Stärke als Erwachsene. Hierbei ist die neuronale Aktivierung in den Arealen des Netzwerkes umso geringer, je jünger die Kinder sind.

Im zweiten Schritt sollte über alle Altersgruppen hinweg untersucht werden, mit welchen neuronalen Korrelaten ein Anstieg der Anforderungen im Hinblick auf die Präzision der Selektion einhergeht. Die Studie von Shim et al. (2009) lässt einen Anstieg der Aktivierung in den FEF erwarten. Es resultiert:

**Hypothese 10:** Bei erhöhten Anforderungen an die Präzision der Selektion zeigt sich über die Altersgruppen hinweg ein Anstieg der neuronalen Aktivität in den FEF.

Im dritten Schritt wurde untersucht, inwieweit dieser Anstieg auch bei Kindern zu beobachten ist. Da die FEF sowohl funktionell (Klingberg et al., 2002) als auch strukturell (z.B. Gogtay et al., 2004; Sowell et al., 2004) im mittleren bis späten Kindesalter noch nicht vollständig gereift sind, war zu erwarten, dass der Anstieg der Aktivierung in den FEF geringer als bei den Erwachsenen ausfallen würde und dies umso mehr, je jünger die Kinder sind. Es resultiert die folgende Hypothese:

**Hypothese 11:** Bei erhöhten Anforderungen an die Präzision der Selektion steigt die neuronale Aktivität der FEF in den Kindergruppen weniger stark an als bei Erwachsenen. Der Anstieg ist umso geringer, je jünger die Kinder sind.

Die detaillierte Operationalisierung der psychologischen Hypothesen und die Ableitung der statistischen Hypothesen erfolgt im Methodenabschnitt des jeweiligen Experiments.

## **4 Experiment 1: Entwicklung der Auflösung der Aufmerksamkeit**

In Experiment 1 wird untersucht, wie sich die Auflösung der Aufmerksamkeit vom mittleren Kindesalter bis hinein in das frühe Jugendalter entwickelt. Zur Untersuchung der Fragestellung wurde eine Object-Tracking-Aufgabe (Pylyshyn & Storm, 1988) verwendet, bei der der Abstand zwischen dem zu verfolgenden Zielreiz und den Distraktoren variiert wurde. Mit einer zusätzlichen Kontrollaufgabe sollte abgesichert werden, dass die Entwicklung der Auflösung der Aufmerksamkeit nicht auf die Entwicklung der dynamischen Sehschärfe zurückgeführt werden kann. Hierzu absolvierten die Probanden ein Lücken-Detektions-Experiment, bei dem der Abstand zwischen einem statischen und einem dynamischen Punkt variiert wurde.

### **4.1 Methode**

Das gerade skizzierte Vorgehen wird in diesem Kapitel detailliert beschrieben. Zunächst wird die Operationalisierung der psychologischen Hypothesen und das Vorgehen bei der statistischen Auswertung erläutert (4.1.1) und darauf aufbauend die statistischen Hypothesen vorgestellt (4.1.2). In 4.1.3 folgt die Beschreibung der Stichprobe. Dann werden die verwendeten Materialien (4.1.4) und abschließend der Versuchsablauf (4.1.5) beschrieben. Dabei werden die Object-Tracking-Aufgabe und die Lücken-Detektions-Aufgabe jeweils nacheinander dargestellt.

#### **4.1.1 Operationalisierung und Design**

Zur Operationalisierung der in Kapitel 3 formulierten psychologischen Hypothesen wird im Folgenden zunächst die Auswahl der Altersgruppen erläutert. Anschließend wird die Auswahl bzw. Konzeption der beiden in dieser Untersuchung verwendeten Aufgaben dargestellt und das jeweilige Design verdeutlicht.

##### ***Auswahl der Altersgruppen***

Die Entwicklung der Auflösung der Aufmerksamkeit wurde in fünf verschiedenen Altersgruppen untersucht, nämlich bei sieben-, neun- und elfjährigen Kindern, dreizehnjährigen Jugendlichen und bei Erwachsenen. Zielsetzung hinsichtlich der Altersauswahl war es, die Auflösung der Aufmerksamkeit möglichst breit über das gesamte Kindesalter hinweg und hinein in das Jugendalter zu charakterisieren. Als untere Altersgrenze wurden 6 Jahre gewählt, da ab diesem Alter davon auszugehen ist, dass wichtige Voraussetzungen erfüllt sind, um die Auflösung der Aufmerksamkeit sinnvoll untersuchen zu



können. Erstens sind Kinder ab ca. 6 Jahren in der Lage, einen Ort oder ein Objekt kontinuierlich zu fixieren (Fimm, 2007). Zweitens hat sich hinsichtlich des Object-Tracking-Paradigmas gezeigt, dass Kinder ab ca. 6 Jahren ähnlich gut wie Erwachsene in der Lage sind, ein einzelnes Objekt über einen längeren Zeitraum zu verfolgen (O'Hearn et al., 2005; Trick et al., 2005). Hieraus lässt sich schließen, dass die speziell für diese Aufgabe nötigen Aufmerksamkeitsfunktionen, wie die Fähigkeit zum räumlichen Filtern oder zur räumlichen Ausrichtung der Aufmerksamkeit, in diesem Altersbereich bereits gut entwickelt sind (vgl. auch 2.6) und dass die für diese Aufgabe nötige Ausdauer und Konzentration der von Erwachsenen bereits ähnlich ist. Letzteres spiegelt sich auch in den Befunden verschiedener Entwicklungsstudien wider, die zeigen, dass ab ca. 6 Jahren psychophysische Schwellenwerte reliabel ermittelt werden können (Ellemborg et al., 2004; Ellemborg, Lewis, Liu & Maurer, 1999; Ellemborg et al., 2003). Nach oben wurde die Altersgrenze auf 13 Jahre festgelegt, um das Kindesalter auch im Randbereich komplett abzudecken. Die Erwachsenenstichprobe wurde hinzugezogen, um ein Vergleichsmaß optimaler Leistung zu haben.

### ***Object-Tracking-Experiment***

#### *Versuchsaufbau*

Die Auflösung der Aufmerksamkeit entspricht konzeptionell dem kleinsten Abstand zwischen Objekten, der noch eine individuelle Selektion der Objekte erlaubt (z.B. He et al., 1997; Intriligator & Cavanagh, 2001). Diese auch als kritischer Abstand (vgl. 2.2.1) bezeichnete Distanz wurde bisher vorwiegend mit zwei Paradigmen untersucht, nämlich dem Object-Tracking-Paradigma und der Attentional-Walk-Aufgabe (vgl. 2.2.2). In der vorliegenden Untersuchung sollte zur Messung des kritischen Abstands die Object-Tracking-Aufgabe verwendet werden. Diese Aufgabe erfordert eine länger andauernde Selektion dynamischer Objekte (Bahrami, 2003; Drew, McCollough, Horowitz & Vogel, 2009; Scholl, 2009; Tombu & Seiffert, 2008), wobei die Dynamik der Objekte eine ständige Aktualisierung des selektierten Ortes erforderlich macht (Drew & Vogel, 2008). Da der Versuchsaufbau auch Distraktoren enthält, die gleichzeitig zur Selektion der Zielreize ignoriert werden müssen, hat die Aufgabe zudem eine Filterkomponente. Die Aufgabe selbst erfordert reine Selektion, d.h. die Auswahl einer Untermenge der im visuellen Feld vorhandenen Informationen und die Zurücksetzung der restlichen Informationen (vgl. 2.2.1). Eine genauere Analyse der Reize ist nicht erforderlich. Jedoch ist es dabei notwendig, die Größe der Selektionsregion so einzustellen, dass sie zu jedem Zeitpunkt während der Trackingphase möglichst nur den Zielreiz, nicht aber die Distraktoren enthält. Die beim Tracking stattfindende Selektion kann prinzipiell sowohl als objekt- als auch als ortsbezogen betrachtet werden, wird aber

vorwiegend als räumliche Selektion eingeordnet (Cavanagh & Alvarez, 2005; Scholl, 2009). Ebenso hat der Selektionsprozess während des Verfolgens der Objekte eine exogene und eine endogene Komponente. Er ist insofern exogen, als der Ort der Selektionsregion immer durch den Zielreiz vorgegeben ist. Vor allem setzt das erfolgreiche Absolvieren der Aufgabe jedoch die ununterbrochene Absicht voraus, das Objekt langfristig mit optimal angepasster Größe der Selektionsregion zu verfolgen. Daher ist das Object-Tracking-Paradigma vorwiegend als Versuchsanordnung zur Untersuchung endogener Aufmerksamkeitszuwendung aufzufassen (Bettencourt & Somers, 2009; Iordanescu et al., 2009; Tombu & Seiffert, 2008, 2010).

In der vorliegenden Untersuchung wurde die Object-Tracking-Aufgabe der Attentional-Walk-Aufgabe aus verschiedenen Gründen vorgezogen. Erstens erfordert die Attentional-Walk-Aufgabe stärker als die Object-Tracking-Aufgabe Aufmerksamkeitsfähigkeiten, die nicht zentral für die vorliegende Untersuchung sind und sich im untersuchten Altersbereich noch entwickeln (C. M. Moore et al., 2008; Wainwright & Bryson, 2002). Hierzu gehört erstens das „freie“, d.h. nicht stimulusgebundene Lenken der Aufmerksamkeit innerhalb des Displays und zweitens das Abziehen der Aufmerksamkeit (*disengagement*; Posner & Petersen, 1990; vgl. Box 1.1) von Objekten. Bei der Object-Tracking-Aufgabe ist hingegen ein einfaches Verschieben des Aufmerksamkeitsfokus erforderlich, welches schon früh erwachsenenähnlich ist (Pearson & Lane, 1990). Zudem ist das Verschieben der Aufmerksamkeit in der Object-Tracking-Aufgabe immer an einen (und denselben) Stimulus gebunden, sodass das für Kinder schwierige Abziehen der Aufmerksamkeit entfällt. Es lässt sich also schließen, dass die Object-Tracking-Aufgabe die Auflösung der Aufmerksamkeit direkter abbildet als dies bei der Attentional-Walk-Aufgabe der Fall wäre. Ein zweiter Aspekt, der für die Verwendung der Object-Tracking-Aufgabe spricht, ist, dass diese dynamische Aufgabe Kindern Spaß macht (Trick et al., 2005), sodass von einer hohen Motivation der Kinder auszugehen ist. Dieser Gesichtspunkt spielt vor allem bei jüngeren Kindern eine bedeutsame Rolle, da es für sie schwerer ist, ihre Konzentration über längere Zeiträume aufrechtzuerhalten.

Mit dem Object-Tracking-Paradigma sollte für jede Altersgruppe ein dem kritischen Abstand entsprechender Schwellenwert ermittelt werden. Zur Ermittlung dieses Schwellenwertes wurde der minimale Abstand zwischen Zielreiz und Distraktoren in der Trackingphase variiert. Hierzu wurde für jeden Durchgang ein bestimmter Zielreiz-Distraktor-Abstand festgelegt, der während der Trackingphase eines Durchganges mehrmals erreicht werden musste, aber niemals unterschritten werden durfte. Es wurde nun angenommen, dass die Vorgabe eines bestimmten Zielreiz-Distraktor-Abstandes den Beobachter dazu veranlasst, die Selektionsregion so weit zusammenzuziehen, wie es nötig ist, um Distraktoren nicht in die

Selektionsregion eindringen zu lassen. Gleichzeitig wurde angenommen, dass die Selektionsregion nur so eng zusammengezogen wird, wie es im aktuellen Durchgang notwendig ist, da das Zusammenziehen des Aufmerksamkeitsfokus ressourcenaufwendig ist (vgl. 2.3). Unterschreitet der vorgegebene Zielreiz-Distraktor-Abstand jedoch die minimale Größe der Selektionsregion, die ein Beobachter selbst mit höchstem Ressourceneinsatz herstellen kann, befinden sich beide Objekte im selben Selektionsbereich, können nicht weiter auseinandergehalten werden und es wird möglicherweise im weiteren Verlauf des Durchgangs das falsche Objekt verfolgt.

Während bei Intriligator und Cavanagh (2001), der Abstand zwischen Beobachter und Bildschirm variiert wurde, um unterschiedliche Zielreiz-Distraktor-Abstände herzustellen, wurde in der vorliegenden Studie der Abstand zwischen Zielreiz und Distraktoren variiert, während der Abstand zwischen Beobachter und Bildschirm konstant gehalten wurde. Dies hatte den Vorteil, dass so bei gleichzeitiger Variation des Abstandes die Größe und Geschwindigkeit der Stimuli konstant gehalten und diese Faktoren somit als Störvariablen ausgeschlossen werden konnten. Der minimale Abstand zwischen Zielreiz und Distraktoren – gemessen als Abstand der Mittelpunkte von Zielreiz und Distraktoren – wurde in der vorliegenden Studie in 10 Stufen zwischen 2 und 12 Winkelminuten variiert (2, 2.67, 3.33, 4, 5.33, 6.67, 8, 9.33, 10.67 und 12 Winkelminuten). Dieser breite Abstandsbereich wurde gewählt, um sowohl für Erwachsene als auch für Kinder den Bereich abzudecken, in dem der jeweilige kritische Abstand erwartet wurde. Für die Erwachsenen wurde auf der Basis früherer Studien (vgl. 2.2.2) ein kritischer Abstand zwischen 2.6 und 6 Winkelminuten erwartet und bei Kindern ein größerer kritischer Abstand vermutet. Die feinere Abstufung im unteren Abstandsbereich diente dazu, die Schwelle der Erwachsenen in dem bei ihnen zu erwartenden Schwellenbereich besonders sensitiv messen zu können. Alle Versuchspersonen durchliefen alle Abstandsbedingungen mit einer festen Anzahl von sechs Durchgängen. Damit wurde hier die Methode der konstanten Stimuli (Fechner, 1860) realisiert. Dieses Vorgehen wurde verwendet, da der hier verwendete Versuchsaufbau bisher nicht bei Kindern angewendet worden war und daher ein möglichst umfassendes Bild der Sensitivität der einzelnen Altersstufen über einen breiten Schwierigkeitsbereich gewonnen werden sollte. Neben der Bestimmung von Schwellenwerten mithilfe psychometrischer Funktionen können so weitere wertvolle Informationen über die Leistung der einzelnen Altersgruppen, wie die maximale Leistung der einzelnen Altersgruppen in leichteren Abstandsbedingungen und die Steigung der psychometrischen Funktion, gewonnen werden.

In Anlehnung an den Befund, dass sechs- bis siebenjährige Kinder bereits problemlos Objekte über 6 s (O'Hearn et al., 2005), aber nicht über 9 s (Trick et al., 2005) verfolgen können, wurde für die vorliegende Untersuchung eine Trackingdauer von 7 s gewählt.

Kreuzt man die Abstandsbedingungen der Object-Tracking-Aufgabe mit den untersuchten Altersstufen ergibt sich der in Tabelle 4.1 dargestellte Versuchsplan. Das Experiment wies also ein zweifaktorielles Design auf. Hierbei wurde der Faktor *Altersgruppe* interindividuell und der Faktor *Abstand* intraindividuell variiert.

Tabelle 4.1: Versuchsplan des Object-Tracking-Experiments mit den beiden Faktoren Altersgruppe und Abstand.

		UV B: Abstand									
		2	2.67	3.33	4	5.33	6.67	8	9.33	10.67	12
UV A: Altersgruppe	7	Y <sub>i11</sub>	Y <sub>i12</sub>	Y <sub>i13</sub>	Y <sub>i14</sub>	Y <sub>i15</sub>	Y <sub>i16</sub>	Y <sub>i17</sub>	Y <sub>i18</sub>	Y <sub>i19</sub>	Y <sub>i110</sub>
	9	Y <sub>i21</sub>	Y <sub>i22</sub>	Y <sub>i23</sub>	Y <sub>i24</sub>	Y <sub>i25</sub>	Y <sub>i26</sub>	Y <sub>i27</sub>	Y <sub>i28</sub>	Y <sub>i29</sub>	Y <sub>i210</sub>
	11	Y <sub>i31</sub>	Y <sub>i32</sub>	Y <sub>i33</sub>	Y <sub>i34</sub>	Y <sub>i35</sub>	Y <sub>i36</sub>	Y <sub>i37</sub>	Y <sub>i38</sub>	Y <sub>i39</sub>	Y <sub>i310</sub>
	13	Y <sub>i41</sub>	Y <sub>i42</sub>	Y <sub>i43</sub>	Y <sub>i44</sub>	Y <sub>i45</sub>	Y <sub>i46</sub>	Y <sub>i47</sub>	Y <sub>i48</sub>	Y <sub>i49</sub>	Y <sub>i410</sub>
	Erw.	Y <sub>i41</sub>	Y <sub>i42</sub>	Y <sub>i43</sub>	Y <sub>i44</sub>	Y <sub>i45</sub>	Y <sub>i46</sub>	Y <sub>i47</sub>	Y <sub>i48</sub>	Y <sub>i49</sub>	Y <sub>i410</sub>

Anmerkungen. UV, unabhängige Variable.

Die Antworten in der Object-Tracking-Aufgabe wurden mit der sogenannten *Probe-One-Methode* (Hulleman, 2005) abgefragt. Das heißt, dass am Ende der Trackingphase einer der acht Punkte markiert wurde und die Versuchsperson angeben sollte, ob es sich dabei um den Zielreiz handele oder nicht. In 50 % der Fälle wurde ein Zielreiz markiert, in 50 % der Fälle der Distraktor, der am nächsten am Zielreiz lag. Die Ratewahrscheinlichkeit betrug somit 50 %. Dieses Antwortformat wurde der *Mark-All-Methode* (Hulleman, 2005) vorgezogen, bei der die Probanden am Ende jedes Durchgangs mit einer Computermouse alle Objekte markieren sollten, die ihrer Meinung nach einen Zielreiz darstellen. Da anzunehmen ist, dass vor allem kleinere Kinder noch ungeübt im Umgang mit einer Computermouse sind und dadurch, ungeachtet ihrer Fähigkeiten in der eigentlichen Aufgabe, in ihrer Leistung beeinträchtigt sind, wurde die Probe-One-Methode vorgezogen, in der durch einfachen Tastendruck reagiert werden kann.

#### Statistische Auswertung

Es gibt keine gängige statistische Vorgehensweise zur Bestimmung der Auflösung der Aufmerksamkeit. Während Intriligator und Cavanagh (2001) mittels einer psychometrischen

Funktion einen Schwellenwert bestimmen, den sie als kritischen Abstand bezeichnen, berechnen Moore und Kollegen (C. M. Moore, Hein, Grosjean & Rinkenauer, 2009; C. M. Moore et al., 2007; C. M. Moore et al., 2008) mit varianzanalytischen Verfahren, inwieweit eine bestimmte Abstandsbedingung Auswirkungen auf die Genauigkeit hat.

In der vorliegenden Arbeit sollten die Daten in einem ersten Schritt explorativ mit varianzanalytischen Methoden ausgewertet werden. Hierzu wurden zunächst pro Person die korrekten Antworten pro Abstandsbedingung aufsummiert und mit der Anzahl der maximal möglichen korrekten Antworten ins Verhältnis gesetzt. Die ursprünglich binomialen Daten wurden durch diese Aggregation annähernd intervallskaliert. Diese Daten wurden in eine zweifaktorielle Varianzanalyse (ANOVA) mit Messwiederholung mit dem Zwischensubjektfaktor Altersgruppe und dem Messwiederholungsfaktor Abstand eingespeist. Diese Auswertung erlaubte einen ersten Überblick darüber, ob es bedeutsame Unterschiede zwischen den Leistungen der Altersgruppen gibt bzw. ob sich die Leistung der verschiedenen Altersgruppen über die verschiedenen Abstände hinweg unterschiedlich entwickelt. Im Falle der Verletzung der Sphärizitätsannahme (Eid, Gollwitzer & Schmitt, 2010) wurde Huynh-Feldts  $\epsilon$  (Huynh & Feldt, 1976) zur Korrektur der Freiheitsgrade eingesetzt. Um die Leistungsprofile der verschiedenen Altersgruppen über die verschiedenen Abstandsbedingungen hinweg zusammenfassend charakterisieren zu können, wurden in einem zweiten Schritt psychophysische Schwellenwerte für jede Altersgruppe ermittelt. Hierzu wurden für jede Abstandsbedingung die korrekten Antworten aller Mitglieder einer Altersgruppe aufsummiert und an die resultierenden Leistungsverläufe der einzelnen Altersgruppen psychometrische Funktionen angepasst.<sup>16</sup> Die in der Psychophysik im Allgemeinen verwendeten Funktionen (z.B. die Weibull-Funktion; Klein, 2001) sind mit dem Nachteil behaftet, dass sie starke Annahmen bezüglich der Verteilung der Daten (z.B. Symmetrie) machen, die häufig nicht gegeben sind oder deren Zutreffen unsicher ist (Zychaluk & Foster, 2009). In der vorliegenden Studie wurde die psychometrische Funktion mittels der non-parametrischen *lokalen linearen Regression* geschätzt (Zychaluk & Foster, 2009), deren einzige Annahme darin besteht, dass die Daten einen glatten Verlauf haben. Bei diesem Verfahren wird eine Funktion angepasst, indem an kleine Ausschnitte des Datenverlaufes mithilfe einer Taylor-Expansion lineare Regressionsgeraden angepasst werden (Fan, Heckman & Wand, 1995). Diese Methode berücksichtigt automatisch die Ratewahrscheinlichkeit und die obere Asymptote der Leistung (*lapsing rate*), die bei

---

<sup>16</sup> Unter einer *psychometrischen Funktion* versteht man eine Funktion, die die Leistung eines Beobachters in Abhängigkeit von der Ausprägung einer unabhängigen Variable, gewöhnlich der Intensität eines Stimulus, beschreibt (Treutwein & Strasburger, 1999; Wichmann & Hill, 2001).

herkömmlichen Kurvenanpassungsverfahren häufig ein Problem darstellen (Wichmann & Hill, 2001).

Von den für die einzelnen Altersgruppen resultierenden Funktionen wurde jeweils der *absolute Schwellenwert* (Fechner, 1860) abgeleitet, welcher hier als statistische Entsprechung des kritischen Abstandes verwendet werden soll. Der absolute Schwellenwert ist per Konvention definiert als die Stimulusstärke, bei welcher der Stimulus in 50 % der Durchgänge wahrgenommen werden kann (Gescheider, 1997; D. M. Green & Swets, 1966; Kingdom & Prins, 2010). Im Falle einer Ratewahrscheinlichkeit größer Null, muss der Schwellenwert um die Ratewahrscheinlichkeit korrigiert werden. Dies geschieht anhand der Formel (abgewandelt nach Strasburger, 2001):

$$P_c = \gamma + (1 - \gamma)/2 \quad (1)$$

Hierbei entspricht  $P_c$  der Schwelle und  $\gamma$  der Ratewahrscheinlichkeit (diese entspricht  $1/n$  für eine Forced-Choice-Aufgabe mit  $n$  Alternativen). Es resultiert der Wert der Abszisse, der sich in der Mitte zwischen Ratewahrscheinlichkeit und maximaler Leistung befindet (Strasburger, 2001). Für das hier verwendete Object-Tracking-Experiment mit einer Ratewahrscheinlichkeit von 50 % und einer maximalen Leistung von 100 % ergibt sich demnach ein absoluter Schwellenwert, der einer Leistung von 75 % entspricht.

Um die Schwellenwerte der verschiedenen Altersgruppen inferenzstatistisch vergleichen zu können, wurden die 95 %-Konfidenzintervalle der jeweiligen Schwellenwerte geschätzt. Hierzu wurde ein Bootstrapping-Verfahren (Efron & Tibshirani, 1993; Foster & Bischof, 1991) mit 10000 Resamplings verwendet (Davison & Hinkley, 1997). Um festzustellen, ob es signifikante Unterschiede zwischen den Schwellenwerten der Altersgruppen gibt, wurden die Schwellenwerte von je zwei Altersgruppen verglichen und geprüft, ob sich die Konfidenzintervalle dieser Altersgruppen überschneiden. Dieses Vorgehen ähnelt dem  $t$ -Test für unabhängige Stichproben, liefert jedoch etwas konservativere Ergebnisse (R. Wolfe & Hanley, 2002). Da mehrere Konfidenzintervalle miteinander verglichen wurden, wurde die Überdeckungswahrscheinlichkeit der Konfidenzintervalle mit einer Bonferroni-Korrektur angepasst. Die korrigierten Überdeckungswahrscheinlichkeiten der Konfidenzintervalle werden jeweils im Kontext der statistischen Hypothesen angegeben.

Wie in der Literatur für den Fall nicht vorgenommener A-priori-Testplanung empfohlen (Guyatt et al., 1995; Levine & Ensom, 2001), werden hier zur Einschätzung der praktischen Bedeutsamkeit der Ergebnisse (Bortz & Schuster, 2010) empirische Effektstärken berichtet.

Die Effektstärken der einzelnen Tests werden, wie von Rosnow und Rosenthal (2003) empfohlen, in Form von Korrelationskoeffizienten angegeben.

### ***Lücken-Detektions-Experiment***

#### ***Versuchsaufbau***

Mit einem Kontrollexperiment sollte die dynamische Sehschärfe für alle Altersgruppen ermittelt werden. Hierzu sollte ein Versuchsaufbau konstruiert werden, der den Anforderungen der Object-Tracking-Aufgabe im Hinblick auf die Stimuluseigenschaften möglichst stark ähnelt. Typischerweise wird die dynamische Sehschärfe ermittelt, indem Landolt-Ringe in unterschiedlicher Größe und Geschwindigkeit präsentiert werden und überprüft wird, bis zu welcher Größe bzw. Geschwindigkeit die Probanden die Lücke im Landolt-Ring erkennen können (Ludvig, 1948; Ludvig & Miller, 1958). Dieser Versuchsaufbau unterscheidet sich jedoch stark von den Anforderungen der Object-Tracking-Aufgabe. Erstens erfordert er Formerkennung, welche in der Objekt-Tracking-Aufgabe nur eine untergeordnete Rolle spielt. Zweitens ist in diesem Versuchsaufbau die wahrzunehmende Lücke über einen längeren Zeitraum, nämlich solange der Landolt-Ring dargeboten wird, sichtbar, während im Object-Tracking-Experiment die relevanten Zusammentreffen von Zielreiz und Distraktor nur sehr kurz andauern. Intriligator und Cavanagh (2001) verwendeten zur Messung der dynamischen Sehschärfe zwei Kreise, die sich um einen imaginären Mittelpunkt bewegten. Der Abstand der beiden Kreise wurde variiert und die Probanden sollten angeben, ob sich die Kreise überlappten oder ob sie dazwischen eine Lücke erkennen konnten. Diese Aufgabe weist insofern größere Ähnlichkeit mit den Anforderungen der Object-Tracking-Aufgabe auf, als sie ähnliche Stimuli wie diese verwendet. Gleichzeitig sind jedoch auch hier die Punkte über einen langen Zeitraum sichtbar, sodass sich die Probanden durch längeres Beobachten ihr Urteil bilden können. Um an dieser Stelle eine größere Ähnlichkeit mit den Anforderungen der Object-Tracking-Aufgabe herzustellen, wurde für die vorliegende Arbeit ein Lücken-Detektionsexperiment konzipiert, bei dem die beiden Punkte nur kurz aufeinandertrafen. Es wurden den Probanden zwei Punkte dargeboten, von denen sich einer der Punkte durchgängig in der Mitte des Bildschirms befand. Der zweite Punkt bewegte sich mit einer parabelförmigen Trajektorie auf den statischen Punkt zu und dann wieder davon weg. Der Scheitelpunkt der Parabel war zugleich der Punkt, an dem der dynamische Punkt dem statischen am nächsten war. Der Abstand zwischen dem statischen Punkt und dem Scheitelpunkt der Bewegung des dynamischen Punktes wurde zwischen den Durchgängen variiert, um herauszufinden, ab welchem Abstand die Probanden eine Lücke sehen und die beiden Objekte somit visuell auflösen konnten. Unter Abstand wurde hier, wie

im Object-Tracking-Experiment, der Abstand zwischen den Mittelpunkten der beiden Punkte verstanden. Es wurden neun Abstandsbedingungen realisiert, die äquidistant zwischen 1.33 und 6.67 Winkelminuten lagen. Bei der kleinsten Abstandsbedingung berührten sich die Punkte, in allen anderen Bedingungen gab es eine Lücke zwischen den Punkten.

Das Experiment wies ein zweifaktorielles Design auf, in dem der erste Faktor *Altersgruppe* interindividuell und der zweite Faktor *Abstand* intraindividuell variiert wurde. Tabelle 4.2 veranschaulicht das Design des Experimentes.

Tabelle 4.2: Versuchsplan des Lücken-Detektions-Experiments mit den beiden Faktoren Altersgruppe und Abstand.

		UV B: Abstand								
		1.33	2	2.67	3.33	4	4.67	5.33	6	6.67
UV A: Altersgruppe	7	Y <sub>i11</sub>	Y <sub>i12</sub>	Y <sub>i13</sub>	Y <sub>i14</sub>	Y <sub>i15</sub>	Y <sub>i16</sub>	Y <sub>i17</sub>	Y <sub>i18</sub>	Y <sub>i19</sub>
	9	Y <sub>i21</sub>	Y <sub>i22</sub>	Y <sub>i23</sub>	Y <sub>i24</sub>	Y <sub>i25</sub>	Y <sub>i26</sub>	Y <sub>i27</sub>	Y <sub>i28</sub>	Y <sub>i29</sub>
	11	Y <sub>i31</sub>	Y <sub>i32</sub>	Y <sub>i33</sub>	Y <sub>i34</sub>	Y <sub>i35</sub>	Y <sub>i36</sub>	Y <sub>i37</sub>	Y <sub>i38</sub>	Y <sub>i39</sub>
	13	Y <sub>i41</sub>	Y <sub>i42</sub>	Y <sub>i43</sub>	Y <sub>i44</sub>	Y <sub>i45</sub>	Y <sub>i46</sub>	Y <sub>i47</sub>	Y <sub>i48</sub>	Y <sub>i49</sub>
	Erw.	Y <sub>i41</sub>	Y <sub>i42</sub>	Y <sub>i43</sub>	Y <sub>i44</sub>	Y <sub>i45</sub>	Y <sub>i46</sub>	Y <sub>i47</sub>	Y <sub>i48</sub>	Y <sub>i49</sub>

Anmerkungen. UV, unabhängige Variable.

Die Abfrage der Antwort im Lücken-Detektions-Experiment fand in zwei Stufen statt. In einem ersten Schritt sollten die Probanden angeben, ob sie eine Lücke gesehen hatten oder nicht. Im zweiten Schritt sollten sie angeben, ob sie sich ihrer Antwort sicher waren oder nicht. Die Kombination der beiden Antworten ergab eine vierstufige Sicherheitseinschätzung hinsichtlich der Frage, ob eine Lücke gesehen wurde oder nicht.

### Statistische Auswertung

Die statistische Auswertung wurde analog zur Auswertung des Object-Tracking-Experiments vorgenommen. Zunächst wurde für jede Versuchsperson für jede Abstandsbedingung der Anteil der Durchgänge ermittelt, in denen die Versuchsperson angegeben hatte, eine Lücke gesehen zu haben. In diese Berechnung wurden nur die Antworten des ersten Antwortschrittes einbezogen. Basierend auf diesen Daten wurde eine zweifaktorielle ANOVA mit Messwiederholung mit dem Zwischensubjektfaktor Altersgruppe und dem Messwiederholungsfaktor Abstand gerechnet. Zur genaueren Analyse signifikanter Haupteffekte wurden Post-hoc-Vergleiche gerechnet. Die kritischen Werte der multiplen



Paarvergleiche wurden mit der Bonferroni-Korrektur des SPSS-Statistik-Paketes (Version 19) korrigiert.

Anschließend wurden die absoluten Schwellenwerte jeder Altersbedingung ermittelt. Hierzu wurden zunächst die Anzahl der Ja-Antworten pro Abstandsbedingung über alle Mitglieder einer Altersgruppe aufsummiert und an die pro Altersgruppe resultierenden Leistungsverläufe mittels lokaler linearer Regression (Zychaluk & Foster, 2009) psychometrische Funktionen angepasst. Der absolute Schwellenwert war auch hier als der Wert der Abszisse, an dem die psychometrische Funktion die Mitte zwischen Ratewahrscheinlichkeit und maximaler Leistung erreicht, definiert. Die Ratewahrscheinlichkeit ist in Ja-Nein-Detektionsaufgaben (wie der Lücken-Detektions-Aufgabe) gleich des Anteils Ja-Antworten in der Bedingung mit der geringsten Stimulusintensität, wobei in Pilotexperimenten sichergestellt werden soll, dass dieser bei Null liegt (Treutwein & Strasburger, 1999). Aus der Ratewahrscheinlichkeit von 0 % ergibt sich für das Lücken-Detektions-Experiment also ein Wert von 50 % als absoluter Schwellenwert. Das Object-Tracking-Experiment und das Lücken-Detektions-Experiment weisen somit numerisch unterschiedliche, inhaltlich jedoch äquivalente Schwellenwerte auf.

Um zu überprüfen, ob die verschiedenen Altersgruppen Unterschiede in den Schwellenwerten des Lücken-Detektions-Experiments aufwiesen, wurden auch hier mittels Bootstrapping Konfidenzintervalle mit einer Überdeckungswahrscheinlichkeit von 95 % um die absoluten Schwellenwerte der einzelnen Altersgruppe berechnet, deren Überdeckungswahrscheinlichkeit für multiple Vergleiche Bonferroni-korrigiert wurde.

#### **4.1.2 Statistische Hypothesen**

Im Anschluss an die Operationalisierung ist nun eine Übersetzung der in Kapitel 3 formulierten psychologischen Hypothesen in statistische Hypothesen möglich.

##### ***Hypothese 1***

Die erste Hypothese besagt, dass die Auflösung der Aufmerksamkeit mit zunehmendem Alter zunimmt. Als statistischer Kennwert für die Auflösung der Aufmerksamkeit wurde der sich aus der lokalen linearen Regression ergebende Schwellenwert (entsprechend der absoluten Schwelle einer Leistung von 75 %) eingeführt. Die entsprechende statistische Hypothese lautet nun:

**H1:** Die Schwellenwerte der verschiedenen Altersgruppen nehmen mit zunehmendem Alter ab.

Diese Hypothese soll geprüft werden, indem die Schwellenwerte der jeweils benachbarten Altersgruppen verglichen werden. Es werden somit vier geplante Vergleiche durchgeführt.

Hieraus ergibt sich ein korrigiertes  $\alpha$ -Niveau von 1.25 % pro Vergleich. Für die zu vergleichenden Konfidenzintervalle resultieren Überdeckungswahrscheinlichkeiten von 98.75 %.

Als Entscheidungskriterium (vgl. Hager et al., 2001) soll hier ein disjunktes bzw. wohlwollendes Entscheidungskriterium verwendet werden, welches besagt, dass mindestens eine dieser Teilhypothesen zutreffen muss, damit die H1 als eingetreten beurteilt werden kann. Die detaillierte statistische Hypothese besagt also, dass mindestens ein Schwellenwert einer jüngeren Altersgruppe signifikant größer sein muss als der Schwellenwert einer älteren Altersgruppe.

### ***Hypothese 2***

Hypothese 2 besagt, dass alle Altersstufen dieselbe dynamische Sehschärfe aufweisen. Der statistische Kennwert für die dynamische Sehschärfe entspricht dem mittels lokaler linearer Regression ermittelten absoluten Schwellenwert für jede Altersgruppe (entsprechend einer Leistung von 50 %). Die entsprechende statistische Hypothese lautet:

**H2:** Die Schwellenwerte der verschiedenen Altersgruppen unterscheiden sich nicht.

Die Hypothese soll geprüft werden, indem die Schwellenwerte aller Altersgruppen verglichen werden. Es resultieren somit neun geplante Vergleiche. Das Bonferroni-korrigierte  $\alpha$ -Niveau der Einzelvergleiche liegt somit bei 0.56 % (99.44 %-Konfidenzintervalle). Als Entscheidungskriterium (vgl. Hager et al., 2001) soll hier ein konjunktives bzw. strenges Entscheidungskriterium verwendet werden, d.h., dass alle Teilhypothesen zutreffen müssen, um die H2 als zutreffend beurteilen zu können. Die detaillierte statistische Hypothese besagt also, dass sich die Schwellenwerte aller Altersgruppen nicht unterscheiden.

### **4.1.3 Versuchspersonen**

An der Untersuchung nahmen insgesamt 115 Personen zwischen 6 und 39 Jahren teil. Die Stichprobe setzte sich aus fünf Altersgruppen mit je 23 Teilnehmern zusammen: Siebenjährigen (entsprechend der Klassenstufe 1; 11 männlich, mittleres Alter 7.1 Jahre, Spannweite 6.4-7.7 Jahre), Neunjährigen (Klassenstufe 3; 12 männlich, mittleres Alter 8.9 Jahre, Spannweite 8.4-10.1 Jahre), Elfjährigen (Klassenstufe 5; 12 männlich, mittleres Alter 11.3 Jahre, Spannweite 10.4-11.9 Jahre), Dreizehnjährigen (Klassenstufe 7; 11 männlich, mittleres Alter 13.3 Jahre, Spannweite 12.6-13.9 Jahre) und Erwachsenen (12 männlich, mittleres Alter 25.0 Jahre, Spannweite 20.0-39.9 Jahre). Eine zusätzliche Teilnehmerin aus der ersten Klasse wurde nach der Datenerhebung aus der Stichprobe ausgeschlossen, da sie die Aufgabenstellungen nicht verstanden hatte. Alle Teilnehmer hatten keine

Seheinschränkungen und einen korrigierten oder unkorrigierten Visus von mindestens 1.0 (gemessen mit einer konventionellen Landolt-Sehtafel; Schairer, Stuttgart). Die Altersgruppen unterschieden sich nicht in ihrem Visus ( $F(4, 110) = 1.18, p = .32, \eta^2 = .041$ ). Der Intelligenzquotient aller Teilnehmer, gemessen mit dem nonverbalen Matrizen-Untertest des *Kaufman Brief Intelligence Tests* (KBIT-2; A. S. Kaufman & Kaufman, 2004), lag zwischen 70 und 130.

In den einzelnen Altersgruppen wurde versucht, die schulische Leistungsspanne eines Jahrgangs nachzubilden, indem je ein Drittel der Teilnehmer jeder Altersstufe aus dem unteren, mittleren bzw. oberen schulischen Leistungsbereich des Jahrgangs entnommen wurde. Bei den sieben- und neunjährigen Teilnehmern wurde dies durch die Klassenlehrer eingeschätzt, von den Elf- und Dreizehnjährigen besuchte je ein Drittel der Teilnehmer die Hauptschule, die Realschule oder das Gymnasium. Für die Erwachsenen wurde als Kriterium die Schulform herangezogen, welche die Teilnehmer direkt nach der Grundschule besucht hatten. Je ein Drittel der erwachsenen Teilnehmer hatte nach der Grundschule zuerst die Haupt- oder Realschule oder das Gymnasium besucht.

Die sieben- und neunjährigen Teilnehmer und die elf- und dreizehnjährigen Teilnehmer der Hauptschule waren Schüler einer Karlsruher Grund- und Hauptschule und wurden rekrutiert, indem ihnen durch die Lehrkräfte gezielt Elternbriefe ausgeteilt wurden. Die elf- und dreizehnjährigen Teilnehmer aus Realschule und Gymnasium wurden durch Elternbriefe geworben, die in Klassen der entsprechenden Schulform verteilt wurden. Die Erwachsenen waren teilweise Studenten der Pädagogischen Hochschule (PH) Karlsruhe, teilweise waren sie durch Aushänge auf die Untersuchung aufmerksam geworden. Die Kinder und Jugendlichen erhielten für ihre Teilnahme eine Süßigkeit oder ein kleines Geschenk, die Erwachsenen wurden für die Teilnahme bezahlt. Die Studie war vom Regierungspräsidium Karlsruhe genehmigt worden und alle Teilnehmer bzw. deren Eltern erklärten sich schriftlich mit der Teilnahme an der Studie einverstanden.

#### **4.1.4 Material und Stimuli**

Die zwei computergestützten Experimente wurden auf einem PC (Shuttle, Barebone SG31G2S, Intel Core 2 Duo, Windows XP) mit der Grafikkarte NVIDIA GeForce 8400 GS durchgeführt und die Stimuluspräsentation und Antwortregistrierung mittels der Software E-Prime 2.0 Professional (Psychology Software Tools, 2007) kontrolliert. Die Stimuli wurden auf einem 17"-LCD-Monitor (Terra, LCD 4217) mit einer Auflösung von 1280 x 1024 und einer Bildwiederholungsrate von 60 Hz dargeboten. Zum Registrieren der Antworten wurde

eine gewöhnliche USB-Tastatur eingesetzt, auf der die nötigen Tasten durch farbige Aufkleber markiert worden waren.

### ***Object-Tracking-Experiment***

Im Object-Tracking-Experiment bestand das Display aus einem schwarzen quadratischen Feld (RGB [0 0 0], Leuchtdichte  $27.4 \text{ cd/m}^2$ , gemessen mit einer Konica Minolta CS 1000) mit einer Seitenlänge von  $0.81^\circ$  Sehwinkel, das in der Mitte des Bildschirms auf einem dunkelgrauen Hintergrund (RGB [30 30 30],  $51.8 \text{ cd/m}^2$ ) dargeboten wurde. Dieser füllte den gesamten Bildschirm aus. In dem schwarzen Quadrat wurden acht fast weiße runde Punkte (ein Zielreiz, sieben Distraktoren; RGB [200 200 200];  $159 \text{ cd/m}^2$ ) mit einem Radius von  $0.0112^\circ$  Sehwinkel (bzw.  $0.675$  Winkelminuten) gezeigt (vgl. Abbildung 4.1).

In den Trackingphasen der einzelnen Durchgänge bewegten sich die Punkte innerhalb des schwarzen Quadrates nach einem bestimmten vordefinierten Bewegungsmuster. Die Bewegung eines Punktes von einer Bildschirmaktualisierung zur nächsten (33 ms) wurde durch einen Vektor mit zwei Komponenten bestimmt, welche die horizontale und vertikale Bewegungsrichtung kodierten. Die Werte der beiden Komponenten konnten zwischen -2 und +2 Pixeln variieren, wobei positive Werte Bewegungen nach rechts bzw. oben und negative Werte Bewegungen nach links bzw. unten entsprachen. Zu Beginn der Trackingphase wurde jedem Punkt zufällig ein Vektor zugeordnet, der mindestens über fünf Frames beibehalten wurde. Danach änderte sich der Vektor mit einer Wahrscheinlichkeit von 10 % pro Frame. Bei einer Richtungsänderung wurde jeder der beiden Komponenten des Vektors zufällig und unabhängig voneinander ein Wert von 1 Pixel dazu addiert oder abgezogen. Danach setzte der Punkt seine Bewegung wieder für mindestens fünf Frames in der neu ermittelten Richtung fort. Ein Stehenbleiben der Punkte war nicht möglich: Wurde der Vektor (0,0) gezogen, wurde dieser sogleich verworfen und so lange ein neuer Vektor gezogen, bis er von (0,0) abwich. Wurde einer (oder beiden) der Komponenten des Vektors ein Wert größer 2 zugeordnet, wurde diese Komponente automatisch auf 2 zurückgesetzt. Die Geschwindigkeit der Punkte variierte zwischen  $0.87 \text{ cm/s}$  ( $0.19^\circ/\text{s}$ ) und  $2.64 \text{ cm/s}$  ( $0.56^\circ/\text{s}$ ). Beim Aufeinandertreffen zweier Punkte oder eines Punktes mit der Wand stießen sich die Punkte gemäß dem Reflexionsgesetz ab. Der minimale Abstand zwischen zwei Distraktoren betrug in allen Bedingungen 4 Winkelminuten. Der minimale Abstand zwischen Zielreiz und Distraktoren wurde zwischen den verschiedenen Durchgängen in den zehn in 4.1.1 beschriebenen Abstufungen zwischen 2 und 12 Winkelminuten variiert (aber innerhalb eines Durchganges konstant gehalten).

Innerhalb jedes Durchgangs musste die Bewegung des Zielreizes über die Einhaltung des Zielreiz-Distraktor-Abstandes hinaus bestimmte Kriterien erfüllen. Diese Kriterien waren definiert, um eine vergleichbare Bewegung der Punkte in allen Abstandsbedingungen sicherzustellen. Innerhalb eines Durchgangs musste der Zielreiz genau sechs Mal bis auf den für den betreffenden Durchgang festgelegten minimalen Abstand an einen Distraktor herankommen und genau fünf Mal mit der Wand des schwarzen Quadrates zusammentreffen. Außerdem wurde das schwarze Quadrat sowohl entlang der x- als auch der y-Achse in sechs gleich lange Teile zerlegt, sodass sich insgesamt 36 Unterquadrate ergaben. Jeder Zielreiz musste während eines Durchgangs genau 16 dieser Quadrate durchlaufen, wobei Quadrate auch mehrmals durchlaufen werden konnten. Die Bewegungen der Distraktoren mussten diese Kriterien nicht einhalten.

Die Bewegungssequenzen wurden vorab mit der Software Java (Version 6.31) generiert und die einzelnen Bilder mit VirtualDub (A. Lee, 2009) zu Filmsequenzen kompiliert. Es wurden fünf komplette Stimulussets erstellt, von denen jedem Probanden zufällig eines zugeordnet wurde.

### ***Lücken-Detektions-Experiment***

Im Lücken-Detektions-Experiment wurden zwei fast weiße Punkte auf einem schwarzen Hintergrund dargeboten, der das komplette Display ausfüllte (vgl. Abbildung 4.2). Die Größen-, Farb- und Helligkeitseigenschaften sowohl der Punkte als auch des Hintergrunds waren identisch mit denen des Object-Tracking-Experiments. In den einzelnen Durchgängen befand sich einer der Punkte (der *stationäre* Punkt) durchgängig in der Mitte des Bildschirms. Der zweite Punkt (der *dynamische* Punkt) bewegte sich in jedem Durchgang mit einer parabelförmigen Trajektorie auf den stationären Punkt zu und entfernte sich wieder. Die Bewegung begann jeweils in einer der vier Ecken eines imaginären Quadrates (Seitenlänge  $1.35^\circ$ ), welches sich in der Mitte des Displays befand, und verlief entweder im oder gegen den Uhrzeigersinn. Aus der Kombination von Startpunkt und Bewegungsrichtung ergaben sich somit acht mögliche Trajektorien. Die Geschwindigkeit des dynamischen Punktes betrug zwischen 5.60 cm/s ( $1.19^\circ/\text{s}$ ) am Anfang und Ende der Parabel und 2.61 cm/s ( $0.56^\circ/\text{s}$ ) am Scheitelpunkt der Parabel. Die Geschwindigkeit am Scheitelpunkt war so gewählt, dass sie der maximalen Geschwindigkeit der Punkte während des Object-Tracking-Experiments entsprach. Am Scheitelpunkt der Parabel wurde der Abstand zwischen stationärem und dynamischem Punkt in den neun in 4.1.1 beschriebenen Abstufungen zwischen 1.33 und 6.67 Winkelminuten variiert.

### **Fragebogen**

In einem abschließenden Fragebogen wurden die Versuchspersonen nach persönlichen Daten, Seheinschränkungen, psychischen Störungen und Medikamenteneinnahme befragt.

#### **4.1.5 Ablauf**

Die Untersuchung fand zwischen April und Juli 2009 statt. Für die Grund- und Hauptschüler wurde die Untersuchung in einem Raum der Werner-von-Siemens-Schule Karlsruhe und für die restlichen Probanden im psychologischen Labor des Instituts für Psychologie der PH Karlsruhe durchgeführt. Für die computergestützten Untersuchungsteile wurde der betreffende Raum komplett abgedunkelt und mit einer Lampe im Hintergrund für eine gleichbleibende, geringe Beleuchtungsstärke im Raum gesorgt. Der Abstand zwischen Bildschirm und Probanden betrug 2.68 m. Die Teilnehmer hatten keine Kopfstütze, wurden zu Beginn des Experiments jedoch genau auf den entsprechenden Abstand gebracht und während des Experiments an die Einhaltung des Abstands erinnert, wenn sie ihre Sitzhaltung änderten. Auf eine Kopfstütze wurde verzichtet, weil sie von kleineren Kindern als unangenehm empfunden wird. Die nicht computergestützten Untersuchungsteile fanden im gleichen Raum bei normalen, künstlichen Beleuchtungsverhältnissen statt. Jeder Teilnehmer nahm einzeln an der Untersuchung teil. Die Testung dauerte insgesamt ca. 50 min und war in fünf Abschnitte untergliedert. Tabelle 4.3 gibt einen Überblick über die Reihenfolge und die Dauer der einzelnen Untersuchungsteile.

Tabelle 4.3: Abfolge und Dauer der einzelnen Untersuchungsabschnitte.

<b>Abschnitt</b>	<b>Dauer</b>	<b>Untersuchungsteil</b>
1	3 min	Sehtest
2	5 min	Instruktionen für das Object-Tracking-Experiment und Übung
	20 min	Durchführung des Object-Tracking-Experiments
	3 min	Pause
3	5 min	Instruktionen für das Lücken-Detektions-Experiment und Übung
	5 min	Durchführung des Lücken-Detektions-Experiments
4	5 min	Kaufman Brief Intelligence Test
5	5 min	Schriftliche Nachbefragung

Im Folgenden wird der Ablauf der beiden computergestützten Experimente detailliert beschrieben.

### Object-Tracking-Experiment

Im Object-Tracking-Experiment hatten die Versuchspersonen die Aufgabe, ein Objekt über einen Zeitraum von 7 s zu verfolgen (Abbildung 4.1).

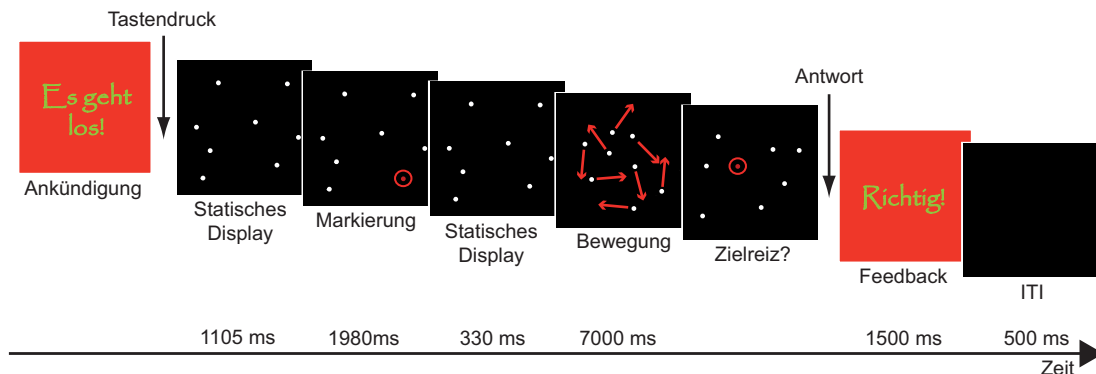


Abbildung 4.1: Ablauf eines Durchgangs im Object-Tracking-Experiment. Nach der Ankündigung des Durchgangs und einem Tastendruck durch den Probanden wurde 1.105 s ein Display präsentiert, in dem ein schwarzes Quadrat mit acht statischen Punkten zu sehen war. Im Anschluss wurde eines der Objekte als Zielreiz markiert. Nach weiteren 330 ms, in denen das statische Display gezeigt wurde, bewegten sich die Punkte für die Dauer von 7 s innerhalb des schwarzen Quadrats. Nachdem die Punkte angehalten hatten, wurde einer der Punkte markiert und die Person sollte angeben, ob es sich bei dem markierten Punkt um den Zielreiz handelte. Der Antwort des Probanden folgte ein Feedback-Display, das 1.5 s gezeigt wurde. Nach einem Intertrialintervall (ITI) von 500 ms, in dem ein schwarzer Bildschirm präsentiert wurde, erschien die Ankündigung des nächsten Durchgangs.

Zu Beginn jedes Durchgangs wurde ein Display mit den Worten „Es geht los!“ gezeigt, das so lange sichtbar blieb, bis die Versuchsperson die Leertaste gedrückt hatte. Im Anschluss wurde für 1.105 s das schwarze Quadrat mit acht statischen weißen Punkten dargeboten, die sich an zufälligen Positionen innerhalb des Quadrates befanden. Während der darauf folgenden 1.98 s wurde einer der Punkte als Zielreiz markiert, indem der betreffende Punkt sechs Mal für jeweils 165 ms rot eingefärbt und mit einem roten Kreis (Radius 16 Winkelminuten) umgeben wurde und anschließend wieder für 165 ms in seinen ursprünglichen Zustand zurückwechselte. Nach einer weiteren Präsentation des statischen Displays (330 ms), fingen die Punkte an, sich nach dem oben beschriebenen Muster in Bewegung zu setzen. Diese Bewegungsphase dauerte 7 s. Danach blieben alle Punkte stehen und einer der Punkte (in 50 % der Fälle der Zielreiz, in 50 % der Fälle der dem Zielreiz nächste Distraktor) wurde, ebenfalls durch Einfärbung und einen umgebenden roten Kreis, markiert. Die Probanden sollten nun angeben, ob es sich bei dem markierten Punkt um den Zielreiz handelte oder nicht, indem sie auf die Tasten drückten, die der Ja- oder Nein-Antwort entsprachen. Nach der Antwort wurde für 1.5 s ein Feedback-Display mit den Worten „Richtig!“ oder „Falsch!“ dargeboten. Im Falle einer korrekten Antwort wurde das visuelle Feedback von einem kurzen Fanfarenton begleitet. Dem Feedback schloss sich ein Intertrialintervall von 500 ms an, in

dem ein komplett schwarzer Bildschirm gezeigt wurde. Im Anschluss startete der nächste Durchgang. Ein Durchgang dauerte (in Abhängigkeit von der Schnelligkeit der Reaktion der betreffenden Versuchsperson) ca. 15 s.

Das Object-Tracking-Experiment bestand aus insgesamt 60 Durchgängen, die in Blöcken von acht Durchgängen und einem letzten Block mit vier Durchgängen in randomisierter Reihenfolge dargeboten wurden. Zwischen den Blöcken hatten die Versuchspersonen die Möglichkeit, eine kurze Pause zu machen und konnten das Experiment durch einen Tastendruck fortsetzen. Vor Beginn des nächsten Blockes wurde die noch ausstehende Anzahl der Durchgänge angegeben. Insgesamt dauerte das Experiment etwa 20 min.

Um eine hohe Motivation vor allem der jüngeren Kinder sicherzustellen, wurde die Object-Tracking-Aufgabe in eine Mittelaltergeschichte eingebettet. Den Versuchspersonen wurde gesagt, dass der markierte Reiz ein Dieb sei, der verfolgt werden müsse, bevor er schließlich überführt werden könne. Jede erfolgreiche Überführung würde mit einem virtuellen Goldsack belohnt. Vor jeder Pause wurde den Kindern eine „Schatzkammer“ präsentiert, die anzeigte, wie viele Goldsäcke sie schon gesammelt hatten, und am Ende des Experiments wurde dieselbe Schatzkammer zur Visualisierung des Endstands gezeigt. Die Einführung in die Geschichte fand während der dem Experiment vorausgehenden Instruktionsphase statt und wurde in schriftlicher Form auf dem Bildschirm präsentiert. Sie wurde den Kindern der ersten Klasse vorgelesen, die älteren Probanden lasen die Instruktion selbstständig. Die Erwachsenen bekamen die gleiche Einführung wie die Kinder.

In die Instruktionsphase war ebenfalls ein Training der Aufgabe integriert. In einem ersten Trainingsschritt wurden zwei Übungsdurchgänge präsentiert, in denen die Stimuli im Vergleich zum tatsächlichen Experiment um das Sechsfache vergrößert waren. Diese Version sollte es vor allem der jüngsten Altersgruppe ermöglichen, die Aufgabenstellung zu üben, ohne dass die Größenverhältnisse die Aufgabe zusätzlich erschwerten. Daneben sollte dem Versuchsleiter so die Möglichkeit gegeben werden herauszufinden, ob der jeweilige Teilnehmer die Aufgabe tatsächlich verstanden hatte. In diesem vergrößerten Versuchsaufbau waren die zu verfolgenden Punkte durch Ritterfiguren ersetzt und zur Markierung des Diebes wurde ein Goldsack präsentiert, um den Kindern die Geschichte noch weiter zu veranschaulichen. Der zeitliche Ablauf dieser Übungsdurchgänge war identisch mit dem Ablauf der späteren Experimentaldurchgänge. Zum Ende der Instruktionsphase wurden zusätzlich noch zwei Übungsdurchgänge dargeboten, die sowohl hinsichtlich der Größenverhältnisse der Stimuli als auch des zeitlichen Ablaufs identisch mit den späteren Experimentaldurchgängen waren. In diesen beiden Durchgängen betrug der minimale



Abstand zwischen Zielreiz und Distraktoren wie in der leichtesten Abstandsbedingung 12 Winkelminuten.

### ***Lücken-Detektions-Experiment***

Im Lücken-Detektions-Experiment hatten die Probanden die Aufgabe anzugeben, ob sie am Scheitelpunkt der vom dynamischen Punkt beschriebenen Parabel eine Lücke zwischen dem dynamischen und dem statischen Punkt gesehen hatten oder nicht (Abbildung 4.2).

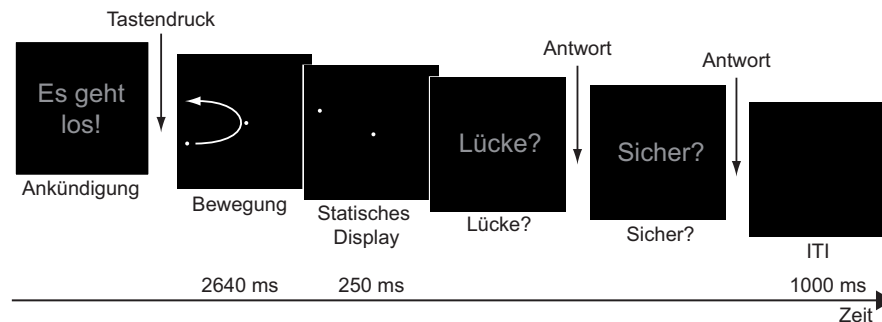


Abbildung 4.2: Ablauf eines Durchgangs im Lücken-Detektions-Experiment. Nach der Ankündigung des Durchgangs konnten die Probanden den Durchgang mit einem Tastendruck starten. Daraufhin begann die Bewegungsphase des Durchgangs. In dieser Phase wurde in der Mitte des Displays durchgängig ein stationärer Punkt gezeigt, während sich ein zweiter Punkt in einer parabelförmigen Bewegung auf den stationären Punkt zu- und dann wieder wegbewegte. Anschließend sollten die Probanden angeben, ob sie am Scheitelpunkt der Parabel eine Lücke zwischen den beiden Punkten gesehen hatten und wie sicher sie sich ihrer Antwort waren. Nach einem Intertrialintervall (ITI) von 1s erschien die Ankündigung des nächsten Durchgangs.

Zu Beginn jedes Durchgangs wurde ein Display mit der Warnung „Es geht los“ dargeboten, das so lange sichtbar blieb, bis die Probanden mit einem Tastendruck reagiert hatten. Die nun folgende Bewegungsphase dauerte 2.64 s. Hier fand die oben beschriebene Bewegung des dynamischen Punktes statt. Währenddessen waren die Probanden instruiert, durchgängig den sich bewegenden Punkt zu fixieren. Nachdem der dynamische Punkt an seinem Endpunkt angekommen war, blieb das vollständige Display für weitere 250 ms sichtbar, bevor die Probanden im nächsten Display aufgefordert wurden anzugeben, ob sie am Scheitelpunkt der Parabel eine Lücke zwischen den beiden Punkten gesehen hatten oder ob die beiden Punkte sich berührt hatten. Die Antwort wurde durch Drücken von Tasten gegeben, die „Lücke“ und „keine Lücke“ entsprachen. Dieser Antwort folgte ein zweites Display, das die Probanden aufforderte anzugeben, wie sicher sie sich bei ihrer Antwort waren. Auch für diese Antwort standen zwei Tasten zur Auswahl, wobei die eine Taste für „sicher“ und die andere für „nicht sicher“ stand. Dieses Display blieb sichtbar, bis eine Antwort gegeben worden war. Die Antworten wurden bei den sieben- und neunjährigen Kindern durch den Versuchsleiter eingegeben. Die Teilnehmer der anderen Altersgruppen gaben ihre Antworten selbst in die Tastatur ein. Auf keine der beiden Antworten folgte ein Feedback. Nach einem

Intertrialintervall von 1 s, in dem ein schwarzer Bildschirm gezeigt wurde, startete der nächste Durchgang.

Das Experiment bestand aus 45 Durchgängen, die in vollständig randomisierter Reihenfolge und ohne Pause dargeboten wurden. Pro Abstandsbedingung wurden fünf Durchgänge präsentiert, wobei die fünf dargebotenen Trajektorien zufällig aus den acht möglichen Bewegungstrajektorien ausgewählt wurden (vgl. 4.1.4). Dabei durfte während des Experiments für einen bestimmten Abstand kein Bewegungsmuster mehr als einmal präsentiert werden. Jeder Durchgang dauerte etwa 10 s, das gesamte Experiment dauerte ca. 5 min.

Die Probanden wurden in einer Instruktions- und Übungsphase auf die Aufgabe vorbereitet. Hier wurde die Aufgabe erklärt und je ein Beispieldurchgang mit bzw. ohne Lücke präsentiert. Im Anschluss absolvierten die Probanden zwei Probedurchgänge, wobei sich in einem der Durchgänge die Punkte klar berührten, und im anderen Durchgang eine deutliche Lücke zwischen den Punkten sichtbar war. Es folgten drei Probedurchgänge, in denen zusätzlich eine Sicherheitseinschätzung gefordert war. Hier wurde neben den beiden Bedingungen des vorherigen Probedurchlaufs noch ein Durchgang mit schwach sichtbarer Lücke gezeigt.

## 4.2 Ergebnisse

In diesem Abschnitt werden die Resultate der statistischen Datenanalyse, zunächst für das Object-Tracking-Experiment, dann für das Lücken-Detektions-Experiment, dargestellt.

### 4.2.1 Object-Tracking-Experiment

#### *Deskriptive Statistik*

Abbildung 4.3 zeigt die mittlere Genauigkeit der verschiedenen Altersgruppen in den verschiedenen Abstandsbedingungen. Aus der Abbildung wird sichtbar, dass die Leistung aller Altersgruppen in den kleinsten Abstandsbedingungen im Bereich der Ratewahrscheinlichkeit und in den größten Abstandsbedingungen im Bereich optimaler oder annähernd optimaler Leistung liegt. Unterschiede zwischen den verschiedenen Altersgruppen werden jedoch in den dazwischen liegenden Abstandsbedingungen sichtbar. Während Erwachsene bereits bei einem geringen Zielreiz-Distraktor-Abstand – nämlich bei ca. 5 Winkelminuten – optimale Leistung erreichen, ist dies bei Kindern erst bei größeren Zielreiz-Distraktor-Abständen der Fall. Genauer ist für das Erreichen optimaler Leistung ein umso größerer Zielreiz-Distraktor-Abstand nötig, je jünger die Kinder sind. So ähneln sich Neun-, Elf- und Dreizehnjährige in ihrem Leistungsprofil und erreichen die optimale Leistung

bei ca. 8 Winkelminuten, wohingegen dies bei Siebenjährigen erst bei ca. 10 Winkelminuten der Fall ist.

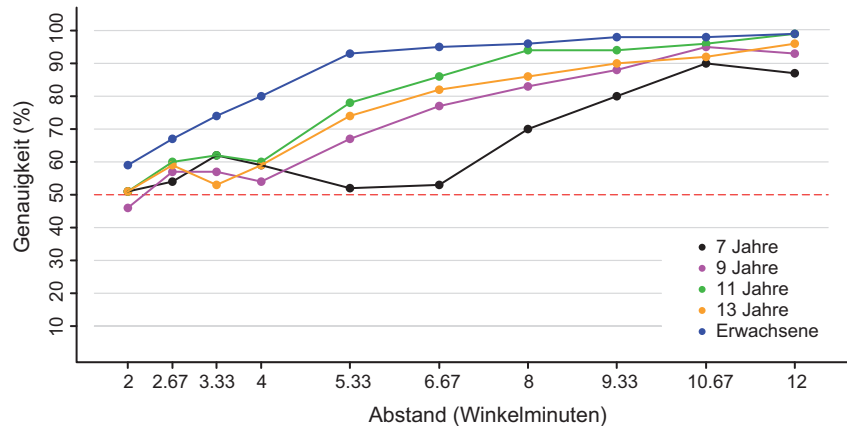


Abbildung 4.3: Mittlere Genauigkeitswerte der Altersgruppen in Abhängigkeit vom Zielreiz-Distraktor-Abstand in der Object-Tracking-Aufgabe. Die Ratewahrscheinlichkeit (rote gestrichelte Linie) betrug 50 %.

### Inferenzstatistische Auswertung

Die zweifaktorielle ANOVA mit Messwiederholung mit dem Zwischensubjektfaktor Altersgruppe (7, 9, 11, 13 Jahre vs. Erwachsene) und dem Messwiederholungsfaktor Abstand (2, 2.67, 3.33, 4, 5.33, 6.67, 8, 9.33, 10.67 vs. 12 Winkelminuten) ergab signifikante Haupteffekte für die Faktoren Altersgruppe ( $F(4,110) = 21.46, p < .0001, \eta^2 = .44$ ) und Abstand ( $F(7.88, 866.34; \epsilon = .88) = 116.01, p < .0001, \eta^2 = .51$ ). Daneben erwies sich die Interaktion Altersgruppe  $\times$  Abstand als signifikant ( $F(31.50, 866.34; \epsilon = .88) = 3.18, p < .0001, \eta^2 = .10$ ).

Abbildung 4.4 gibt die mit lokaler linearer Regression ermittelten psychophysischen Schwellenwerte für die verschiedenen Altersgruppen und die zugehörigen Konfidenzintervalle wieder (für genaue Werte siehe Anhang A, Tabelle A-1).

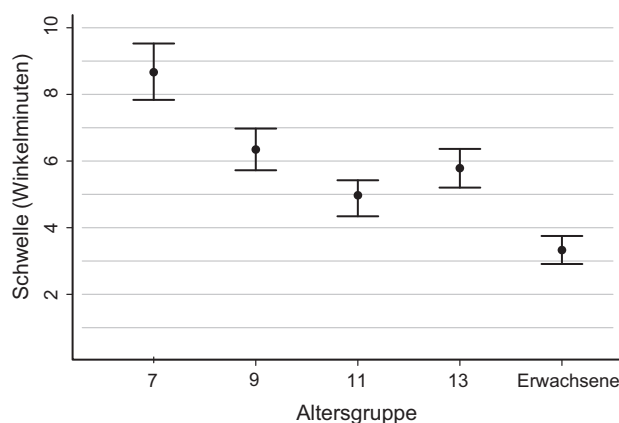


Abbildung 4.4: Absolute Schwellen der einzelnen Altersgruppen in der Object-Tracking-Aufgabe und Bootstrap-Konfidenzintervalle mit einer (Bonferroni-korrigierten) Überdeckungswahrscheinlichkeit von 98.75 %.

Die statistische Hypothese H1 besagt, dass mindestens ein Schwellenwert einer jüngeren Altersgruppe signifikant größer sein muss als der Schwellenwert einer älteren Altersgruppe. Zur Überprüfung der Hypothese wurden die Schwellenwerte der benachbarten Altersgruppen verglichen. Die untere Grenze des Konfidenzintervalls der Siebenjährigen (7.83 Winkelminuten) und die obere Grenze des Konfidenzintervalls der Neunjährigen (6.96 Winkelminuten) überschnitten sich nicht. Die Schwellenwerte der Sieben- und der Neunjährigen unterschieden sich also signifikant voneinander. Genauso wenig überschnitten sich die Konfidenzintervalle der Neunjährigen (untere Grenze: 5.71 Winkelminuten) und Elfjährigen (obere Grenze: 5.41 Winkelminuten). Im Gegensatz dazu überlappten sich die Konfidenzintervalle der Elfjährigen (obere Grenze: 5.41 Winkelminuten) und der Dreizehnjährigen (untere Grenze: 5.21 Winkelminuten), sodass davon auszugehen ist, dass sich die Schwellenwerte dieser beiden Altersgruppen nicht signifikant voneinander unterscheiden. Die Schwellenwerte der Dreizehnjährigen (untere Grenze des Konfidenzintervalls: 5.21 Winkelminuten) und der Erwachsenen (obere Grenze des Konfidenzintervalls: 3.75 Winkelminuten) unterschieden sich wieder signifikant voneinander. Da somit drei Teilhypothesen zutreffen, kann die statistische Hypothese H1 als zutreffend betrachtet werden.

Um herauszufinden, ob eine Altersgruppe, vor allem die Jüngsten, während des Experiments Ermüdungserscheinungen zeigten, wurde die mittlere Genauigkeit der verschiedenen Altersgruppen in der ersten und zweiten Hälfte des Experiments verglichen. Hierzu wurde eine zweifaktorielle ANOVA mit Messwiederholung mit dem Zwischensubjektfaktor Altersgruppe (7, 9, 11, 13 Jahre vs. Erwachsene) und dem Messwiederholungsfaktor Experimentalhälfte (1 vs. 2) gerechnet. Weder der Faktor Experimentalhälfte ( $F(1,110) = 0.21, p = .65, \eta^2 = .002$ ) noch die Interaktion Altersgruppe  $\times$  Experimentalhälfte ( $F(4,110) = 0.83, p = .51, \eta^2 = .03$ ) erwies sich als signifikant, sodass von einer stabilen Leistung aller Altersgruppen über das Experiment hinweg ausgegangen werden kann.

#### **4.2.2 Lücken-Detektions-Experiment**

##### ***Deskriptive Statistik***

Abbildung 4.5 stellt die mittlere Detektionsrate (Anteil der Ja-Antworten) der verschiedenen Altersgruppen als Funktion des Abstandes zwischen den beiden Punkten dar. Die Abbildung zeigt, dass sich die Leistungen der verschiedenen Altersgruppen sehr ähneln. Hiervon ausgenommen sind die Siebenjährigen, deren Detektionsrate in den kleineren Abstandsbedingungen über der aller anderen Altersgruppen liegt.

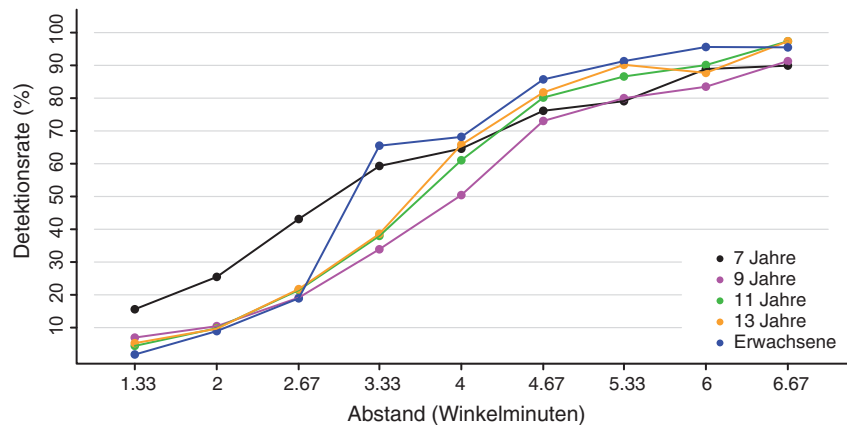


Abbildung 4.5: Mittlere Detektionsraten der Altersgruppen in der Lücken-Detektions-Aufgabe.

### *Inferenzstatistische Auswertung*

Mit den mittleren Detektionsraten der verschiedenen Altersgruppen in den verschiedenen Abstandbedingungen wurde eine zweifaktorielle ANOVA mit Messwiederholung mit dem Zwischensubjektfaktor Altersgruppe (7, 9, 11, 13 Jahre vs. Erwachsene) und dem Messwiederholungsfaktor Abstand (1.33, 2, 2.67, 3.33, 4, 4.67, 5.33, 6 vs. 6.67 Winkelminuten) gerechnet. Sowohl die Faktoren Altersgruppe ( $F(4, 110) = 3.17, p < .05, \eta^2 = .10$ ) und Abstand ( $F(6.02, 662.48; \epsilon = .75) = 383.72, p < .0001, \eta^2 = .77$ ) als auch die Interaktion Altersgruppe  $\times$  Abstand ( $F(24.07, 662.48) = 2.98, p < .0001, \eta^2 = .10$ ) erwiesen sich als signifikant. Post-hoc-Vergleiche zeigen, dass der signifikante Haupteffekt Altersgruppe auf einen signifikanten Unterschied der Detektionsrate von Sieben- und Neunjährigen zurückzuführen ist ( $p < .05$ ).

Die mit lokaler linearer Regression ermittelten psychophysischen Schwellenwerte der verschiedenen Altersgruppen mit den jeweiligen Konfidenzintervallen gibt Abbildung 4.6 wieder (für genaue Werte siehe Anhang A, Tabelle A-2). Die statistische Hypothese H2 besagt, dass sich die Schwellenwerte aller Altersgruppen in der Lücken-Detektions-Aufgabe nicht unterscheiden. Zur Testung dieser Hypothese wurde geprüft, inwieweit sich die Konfidenzintervalle aller Altersgruppen überlappten. Dies war zu einem hohen Grad der Fall. Die Konfidenzintervalle überschneiden sich jedoch nicht für Sieben- und Neunjährige (obere Grenze des Konfidenzintervalls der Siebenjährigen: 3.51 Winkelminuten; untere Grenze des Konfidenzintervalls der Neunjährigen: 3.74 Winkelminuten), für Sieben- und Elfjährige (untere Grenze der Elfjährigen: 3.52 Winkelminuten) und für die Neunjährigen und die Erwachsenen (obere Grenze der Erwachsenen: 3.61 Winkelminuten).

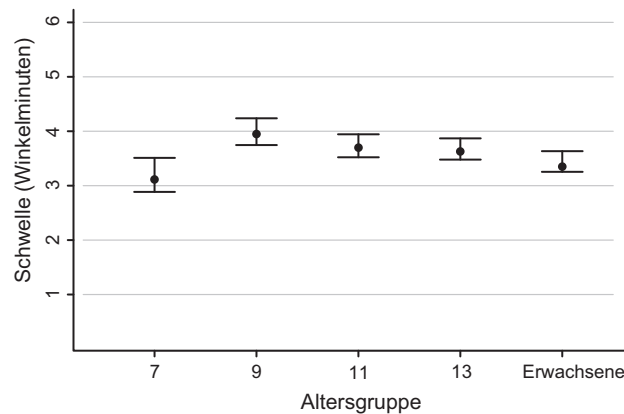


Abbildung 4.6: Dynamische Sehschärfe der verschiedenen Altersgruppen bestimmt mit lokaler linearer Regression und Bootstrap-Konfidenzintervalle mit einer (Bonferroni-korrigierten) Überdeckungswahrscheinlichkeit von 99.44 %.

Die vielfache Überschneidung der Konfidenzintervalle der verschiedenen Altersgruppen deutet auf eine größtenteils konstante dynamische Sehschärfe im untersuchten Altersbereich hin. Eine Ausnahme bildet jedoch der Schwellenwert der Siebenjährigen, der unter dem der Neun- und Elfjährigen liegt. Eine nähere Betrachtung des gesamten Leistungsprofils der Siebenjährigen legt nahe, dass der abweichende Schwellenwert dieser Altersgruppe auf eine Antworttendenz (*response bias*) zurückzuführen sein könnte. Darauf deutet der relativ hohe Anteil Ja-Antworten in der kleinsten Abstandsbedingung (1.33 Winkelminuten) hin, in der am Scheitelpunkt der Parabel objektiv keine Lücke zwischen den beiden Punkten vorhanden war. Es ist davon auszugehen, dass diese Antworttendenz den Schwellenwert der Siebenjährigen beeinflusst und somit die Ursache des überraschend niedrigen Schwellenwertes dieser Altersgruppe darstellt. Um die Antworttendenz in die Berechnungen mit einzubeziehen und eine davon unbeeinflusste Schätzung der Detektionsleistung zu erhalten, wurden die Daten der verschiedenen Altersgruppen mithilfe des Signalentdeckungs-Ansatzes (D. M. Green & Swets, 1966) reanalysiert. Hierzu wurden die Antworten aller Mitglieder einer Altersgruppe pro Abstandsbedingung für jede der vier Antwortabstufungen (*Lücke – sicher*, *Lücke – nicht sicher*, *keine Lücke – nicht sicher*, *keine Lücke – sicher*; vgl. 4.1.1) aufsummiert und auf Basis dieser Daten Receiver-Operating-Characteristic-Kurven (ROC-Kurven) für jede Altersgruppe und Abstandsbedingung ermittelt. Mit dem Maximum-Likelihood-Algorithmus des RScorePlus-Paketes (Harvey, 2010) wurden anschließend Normalverteilungsfunktionen mit ungleichen Varianzen an die ROC-Kurven angepasst. Die Parameter dieser Schätzung wurden verwendet, um  $d_a$  (Simpson & Fitter, 1973) zu berechnen. Hierbei handelt es sich um ein Sensitivitätsmaß ähnlich  $d'$ , das der Differenz der Detektionsrate zweier Abstandsbedingungen geteilt durch die mittlere Varianz der Verteilungen der zwei

Abstandsbedingungen entspricht (Macmillan & Creelman, 2005). Dieses Maß wurde für jedes mögliche Paar von Abstandsbedingungen einer Altersgruppe berechnet. Durch Aufsummieren der  $d_a$ -Werte der jeweils benachbarten Abstandsbedingungen der Altersgruppe wurde im nächsten Schritt für jede Abstandsbedingung der jeweiligen Altersgruppe der *kumulative*  $d_a$ -Wert (Macmillan & Creelman, 2005) berechnet. Mit der Methode der kleinsten Quadrate wurde an die kumulativen  $d_a$ -Werte der Altersgruppen eine lineare Regressionsgerade angepasst und die Abstandsbedingung ermittelt, bei der eine Altersgruppe die Lücke mit einem kumulativen  $d_a$ -Wert von 1 entdeckte (Macmillan & Creelman, 2005). Um die so ermittelten Schwellenwerte der verschiedenen Altersgruppen inferenzstatistisch vergleichen zu können, wurden schließlich für jede Altersgruppe punktweise Konfidenzbänder (Givens & Hoeting, 2013) um den jeweiligen Schwellenwert (entsprechend  $d_a = 1$ ) berechnet. Die Überdeckungswahrscheinlichkeit dieser Konfidenzbänder (95 % für die Gesamthypothese) wurde Bonferroni-korrigiert, woraus Konfidenzbänder mit der Überdeckungswahrscheinlichkeit 99.44 % resultierten.

Abbildung 4.7 zeigt die so geschätzten Schwellenwerte der verschiedenen Altersgruppen und die Konfidenzintervalle um die Schwellenwerte (für genaue Werte siehe Anhang A, Tabelle A-3).

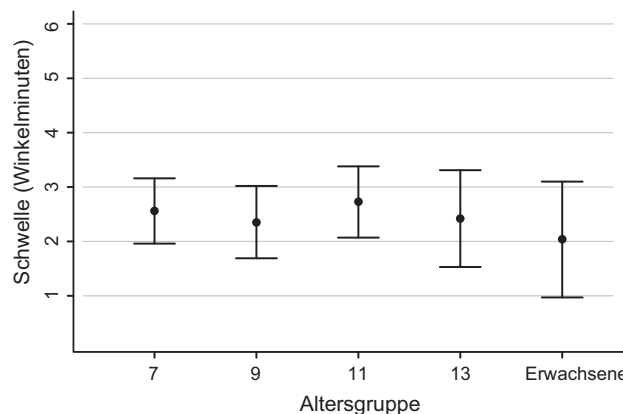


Abbildung 4.7: Dynamische Sehschärfe der verschiedenen Altersgruppen bestimmt mit Signalentdeckungsmethoden und punktweise Konfidenzintervalle mit einer (Bonferroni-korrigierten) Überdeckungswahrscheinlichkeit von 99.44 %.

Die mit Signalentdeckungsmethoden bestimmten Schwellenwerte der einzelnen Altersgruppen ähnelten sich sehr stark und ein Vergleich der Konfidenzintervalle aller Altersgruppen ergab, dass diese sich in allen Fällen überschneiden. Dies lässt darauf schließen, dass sich die Schwellenwerte der einzelnen Altersgruppen, wenn die unterschiedlichen Antworttendenzen der verschiedenen Altersgruppen berücksichtigt werden, nicht unterscheiden und die dynamische Sehschärfe im untersuchten Altersbereich konstant ist. Die

Ergebnisse der Signalentdeckungsanalyse stützen also die Ergebnisse der lokalen linearen Regressionsanalyse, die zeigte, dass die dynamische Sehschärfe zwischen 9 Jahren und dem Erwachsenenalter relativ stabil ist, weiten dieses Ergebnis jedoch zusätzlich auf den Altersbereich der Siebenjährigen aus. Zusammenfassend lässt sich also festhalten, dass sowohl die Ergebnisse der lokalen linearen Regressionsanalyse als auch der Signalentdeckungsanalyse darauf hindeuten, dass die dynamische Sehschärfe, gemessen mit der Lücken-Detektionsaufgabe, im untersuchten Altersbereich im Großen und Ganzen konstant ist. Die statistische Hypothese H2 kann somit als bestätigt betrachtet werden.

### 4.3 Diskussion

Ziel dieser Untersuchung war es, die Entwicklung der Auflösung der Aufmerksamkeit im Kindes- und frühen Jugendalter zu charakterisieren. Hierzu absolvierten Kinder bzw. Jugendliche im Alter von 7, 9, 11 und 13 Jahren und Erwachsene eine Object-Tracking-Aufgabe, in der der minimale Abstand zwischen Zielreiz und Distraktoren während der Trackingphase variiert wurde. Basierend auf den Genauigkeitswerten der einzelnen Altersstufen in den verschiedenen Abstandsbedingungen wurde für jede Altersstufe ein Schwellenwert ermittelt, welcher dem kritischen Abstand, d.h. dem Abstand zwischen Zielreiz und Distraktoren, der mindestens eingehalten werden muss, damit Zielreiz und Distraktor noch individuiert werden können, entspricht. Die Ergebnisse zeigen, dass sich der kritische Abstand zwischen 7 Jahren und dem Erwachsenenalter deutlich verringert. Der Entwicklungsverlauf weist dabei verschiedene Charakteristika auf. Zwischen dem 7. und 9. Lebensjahr war eine starke Verbesserung der Auflösung der Aufmerksamkeit zu beobachten, welche sich in abgeschwächter Form zwischen dem 9. und dem 11. Lebensjahr fortsetzte. Dieser Verlangsamung des Entwicklungsverlaufs folgte ein Plateau zwischen 11 und 13 Jahren, das jedoch nicht das Ende des Entwicklungsverlaufs darstellte. Stattdessen war zwischen dem 13. Lebensjahr und dem Erwachsenenalter noch einmal eine deutliche Verbesserung der Auflösung der Aufmerksamkeit zu beobachten. Das Kontrollexperiment zur dynamischen Sehschärfe zeigte, dass die grundlegenden visuellen Fähigkeiten, die als Voraussetzungen für das Experiment zur Auflösung der Aufmerksamkeit betrachtet werden können, in allen Altersgruppen in ähnlichem Maße gegeben waren und dass die entwicklungsbedingte Verbesserung der Auflösung der Aufmerksamkeit somit nicht auf eine Veränderung der dynamischen Sehschärfe zurückgeführt werden kann.

Der in der vorliegenden Untersuchung für die Erwachsenenstichprobe ermittelte kritische Abstand (3.32 Winkelminuten) ähnelt den Werten früherer Studien (Intriligator & Cavanagh,



2001; Kowler & Steinman, 1977; Landolt, 1891; Nakayama & Mackeben, 1989; Toet & Levi, 1992) und stimmt insbesondere sehr genau mit dem von Intriligator und Cavanagh (2001) für das untere visuelle Feld ermittelten kritischen Abstand (3.5 Winkelminuten) überein. Dies deutet auf eine hohe Validität des hier verwendeten experimentellen Vorgehens hin. Auf dieser Basis werden nun die die Entwicklung der Auflösung der Aufmerksamkeit betreffenden Ergebnisse weiter diskutiert.

#### **4.3.1 Vergleich mit verwandten Entwicklungsstudien**

Da frühere Studien, die mit anderen Methoden darauf abzielten, die Entwicklung der kleinstmöglichen Größe der Selektionsregion zu charakterisieren, keinen klaren Entwicklungsverlauf hervorbrachten, ist es nicht möglich, die vorliegenden Ergebnisse mit einem etablierten Entwicklungsmuster zu vergleichen. Sie sollen daher zu individuellen Aspekten früherer Studien in Bezug gesetzt werden. Die vorliegenden Befunde decken sich mit den Ergebnissen von Enns und Girgus (1985), die zeigen, dass sich zwischen mittlerer und später Kindheit die Fähigkeit, die Selektionsregion zusammenzuziehen, stetig entwickelt und widersprechen damit gleichzeitig Pastò und Burack (1997), die keine Veränderungen in diesem Altersbereich feststellen konnten. Pastò und Burack realisieren jedoch mit Werten von  $0.95^\circ$  und  $5.7^\circ$  nur eine sehr grobe Variation des Zielreiz-Distraktor-Abstandes, sodass naheliegt, dass ihre Ergebnisse auf eine mangelnde Sensitivität des Versuchsaufbaus zurückzuführen sind. Darüber hinaus präzisieren die vorliegenden Befunde, die mit sehr feinen Abstufungen des Zielreiz-Distraktor-Abstandes gewonnen wurden, das Entwicklungsmuster von Enns und Girgus, deren Ergebnisse ebenfalls auf recht groben Abstufungen des Zielreiz-Distraktor-Abstandes beruhen. Sie zeigen, im Gegensatz zu Enns und Girgus, dass der Entwicklungsverlauf zwischen 7 und 11 Jahren nicht gleichmäßig ist, sondern durch eine starke Veränderung zwischen 7 und 9 Jahren und eine gemäßigte Veränderung zwischen 9 und 11 Jahren charakterisiert ist. Uneingeschränkt stimmen die vorliegenden Ergebnisse jedoch sowohl mit den Befunden von Enns und Girgus als auch von Pastò und Burack darin überein, dass das geringste Ausmaß der Selektionsregion selbst in der späten Kindheit noch deutlich über dem von Erwachsenen liegt. Die ältesten der in den beiden Flankierreiz-Studien untersuchten Altersgruppen sind mit 9 (Pastò & Burack, 1997) und 10 Jahren (Enns & Girgus, 1985) jedoch jünger als die älteste Teilnehmergruppe der vorliegenden Untersuchung. Die vorliegende Studie erweitert somit den untersuchten Altersbereich und zeigt, dass sich die Auflösung der Aufmerksamkeit im Altersbereich zwischen 11 und 13 Jahren kaum verändert und somit auch im frühen Jugendalter noch nicht erwachsenenähnlich ist.

Die hier errechneten Schwellenwerte sind deutlich geringer als die in den Studien von Enns und Girgus (1985) und Pastò und Burack (1997) mit dem Flankierreiz-Paradigma ermittelten Werte. Während diese beiden Studien für Sieben- bis Zehnjährige kritische Abstände von  $0.5^\circ$  bis  $2^\circ$  ermittelten, liegen die in der vorliegenden Untersuchung beobachteten Werte für diesen Altersbereich zwischen 5 und 9 Winkelminuten. Die Ergebnisse der Studie von Akhtar und Enns (1989), die zeigen, dass der Fokus der Aufmerksamkeit bei zusätzlicher Hilfestellung durch einen exogenen Hinweisreiz bereits von Fünfjährigen auf 12 Winkelminuten zusammengezogen werden kann, sind denen der vorliegenden Untersuchung ähnlicher, liegen jedoch ebenfalls noch deutlich über den hier beobachteten Werten.

Für die Unterschiede in der Höhe des kritischen Abstandes zwischen der vorliegenden Studie und den Flankierreiz-Studien sind vermutlich Unterschiede im Versuchsaufbau und den daraus abgeleiteten Maßen verantwortlich. Erstens verwenden die Flankierreiz-Studien recht grobe Manipulationen des Zielreiz-Distraktor-Abstandes, was vermutlich zu einer Überschätzung des damit ermittelten kritischen Abstandes führt. In der vorliegenden Studie wird der Zielreiz-Distraktor-Abstand in kleinen Schritten variiert, sodass eine präzise Bestimmung des kritischen Abstandes vorgenommen werden kann und eine Überschätzung vermieden wird. Der zweite und vermutlich in dieser Hinsicht gewichtigere Unterschied zwischen den Flankierreiz-Studien und der vorliegenden Untersuchung liegt in der unterschiedlichen Bedeutung des Begriffs „kritischer Abstand“. In Flankierreiz-Studien wird unter kritischem Abstand der kleinstmögliche Zielreiz-Distraktor-Abstand verstanden, der noch keinen Interferenzeffekt des Distraktors hervorruft (vgl. Intriligator & Cavanagh, 2001). Er entspricht somit einem Abstand, bei dem optimale oder fast optimale Leistung gezeigt wird. Im Gegensatz dazu ist der kritische Abstand in Studien zur Auflösung der Aufmerksamkeit typischerweise als absolute Schwelle (d.h. als der Abstand, bei dem eine Leistung von 50 %, bzw. in der vorliegenden Studie unter Einbezug der Ratewahrscheinlichkeit eine Leistung von 75 %, erbracht wird, Goldstein, 2009; vgl. 4.1.1) definiert. Da zu erwarten ist, dass der Abstand, der einer Leistung von 50 bzw. 75 % entspricht, niedriger ist als der Abstand, der optimaler Leistung entspricht, liegt nahe, dass die kritischen Abstände, die in der vorliegenden Object-Tracking-Aufgabe bestimmt werden, niedriger ausfallen als die kritischen Abstände, die mit der Flankierreiz-Aufgabe ermittelt werden.

Die kritischen Abstände, die in Entwicklungsstudien mit dem Crowding-Paradigma ermittelt wurden, sind den vorliegenden hingegen ähnlich. Die Werte der Studie von Jeon et al. (2010; 6.35 Winkelminuten für Achtjährige, 5.56 Winkelminuten für Elfjährige; vgl. Fußnote 15),

sind vergleichbar mit den Werten der vorliegenden Studie (8.62 Winkelminuten für Siebenjährige, 6.31 Winkelminuten für Neunjährige und 4.96 Winkelminuten für Elfjährige) und die Werte der Studie von Bondarko und Semenov (2005) liegen mit 1.5 und 2.7 Winkelminuten sogar unter den hier ermittelten kritischen Abständen. Es ist sehr wahrscheinlich, dass die Ähnlichkeit in der Höhe der kritischen Abstände dadurch bedingt ist, dass die Crowding-Experimente und das vorliegende Experiment große Ähnlichkeiten aufweisen. Diese Ähnlichkeit macht die Ergebnisse der Crowding-Experimente zu prinzipiell interessanten Vergleichswerten für die vorliegende Studie. Da jedoch auch die verschiedenen Crowding-Studien unterschiedliche Entwicklungsverläufe beschreiben, kann ein Abgleich der Ergebnisse der vorliegenden Studie mit den Ergebnissen der Crowding-Experimente zwangsläufig nur eine teilweise Übereinstimmung hervorbringen. Der in der vorliegenden Studie beobachtete Entwicklungsverlauf ist teilweise konsistent mit dem von Bondarko und Semenov beobachteten Entwicklungsverlauf. Auch sie beobachteten eine stetige Verringerung des kritischen Abstandes zwischen 8 und 12 Jahren. Während jedoch in der Studie von Bondarko und Semenov die Schwellenwerte für Landolt-Ringe und Snellen-Haken ab 11.5 Jahren erwachsenenähnlich sind (sie sind *vermutlich* erwachsenenähnlich, da in der Studie von Bondarko und Semenov keine Erwachsenen-Vergleichsstichprobe erhoben wurde), weisen in der vorliegenden Studie noch Dreizehnjährige kritische Abstände auf, die deutlich über dem Wert der Erwachsenen liegen. Möglicherweise decken sich die vorliegenden Ergebnisse mit dem Entwicklungsverlauf, den Bondarko und Semenov für Streifenmuster als Stimuli beschreiben (erwachsenenähnliche Leistung ab 16.5 Jahren). Da die vorliegende Untersuchung jedoch den Altersbereich über 13 Jahren nicht abdeckt, muss diese Aussage spekulativ bleiben. In ähnlicher Weise stimmen die vorliegenden Ergebnisse teilweise mit denen von Jeon et al. überein. Übereinstimmend mit den vorliegenden Ergebnissen beobachteten diese Autoren noch mit bei Elfjährigen eine Leistung, die sich von Erwachsenen unterscheidet. Gleichzeitig beschreiben sie jedoch im Gegensatz zu den Ergebnissen der vorliegenden Studie einen gleichbleibenden kritischen Abstand zwischen dem 5. und 11. Lebensjahr. Eine nähere Betrachtung der Daten von Jeon et al. ergibt jedoch, dass es durchaus eine Veränderung des kritischen Abstandes zwischen 8 und 11 Jahren gibt, wenn man die absolute Höhe der Schwellenwerte in ihrer Studie betrachtet. Die von ihnen ermittelten Schwellenwerte (6.35 für Achtjährige und 5.56 für Elfjährige) sind den vorliegenden Werten (6.31 für Neunjährige und 4.96 für Elfjährige) sehr ähnlich und die Tatsache, dass die Unterschiede in der Studie von Jeon et al. nicht statistisch bedeutsam sind, ist möglicherweise mangelnder Teststärke zuzuschreiben. Vorsichtig ausgedrückt scheinen die in der

vorliegenden Untersuchung ermittelten Ergebnisse also dem in Crowding-Studien beobachteten Trend zu entsprechen, dass der kritische Abstand bei der Verarbeitung eng zusammenliegender Objekte während der Kindheit stetig abnimmt, im späten Kindesalter aber noch über dem von Erwachsenen liegt.

Zusammenfassend ergibt sich, dass die vorliegenden Ergebnisse hinsichtlich der Fähigkeit, den Fokus der Aufmerksamkeit zusammenzuziehen, dem in Flankierreiz- und Crowding-Studien angedeuteten Entwicklungsmuster entsprechen. Gleichzeitig gehen die aktuellen Ergebnisse jedoch über frühere Befunde hinaus. Wie in Abschnitt 2.7 erläutert, ist in Flankierreiz- und Crowding-Aufgaben neben reiner Selektion der Zielreize auch eine Identifikation dieser Reize vonnöten, sodass in Studien, die die Entwicklung der Leistung in diesen Aufgaben beschreiben, letztlich unklar bleibt, ob die sich entwickelnde Fähigkeit tatsächlich die *Selektion* betrifft oder ob die Gründe für Leistungsverbesserungen auf anderen Verarbeitungsebenen zu suchen sind. Im Gegensatz dazu wird im vorliegenden Versuchsaufbau die untere räumliche Grenze von „eigenschaftsloser“ oder „reiner“ Selektion gemessen. Die vorliegenden Ergebnisse sind somit die ersten, die eindeutig belegen, dass sich die minimale Größe des Aufmerksamkeitsfokus zwischen mittlerer Kindheit und Erwachsenenalter verändert.

#### 4.3.2 Entwicklung der dynamischen Sehschärfe

Im Gegensatz zu den Schwellenwerten der Object-Tracking-Aufgabe weisen die Schwellenwerte des Lücken-Detektions-Experiments über den beobachteten Altersbereich hinweg größtenteils gleichbleibende Werte auf. Dies deutet darauf hin, dass die dynamische Sehschärfe im hier untersuchten Altersbereich bereits vollständig entwickelt ist, während sich die Auflösung der Aufmerksamkeit noch bedeutsam verändert. Der hier hinsichtlich der dynamischen Sehschärfe beobachtete Entwicklungsverlauf ist konsistent mit dem der Studie von Giaschi und Regan (1997), die ab dem Alter von 7 Jahren eine erwachsenenähnliche dynamische Sehschärfe beobachteten. Gleichzeitig unterscheidet er sich von den Verläufen der Studien von Schrauf et al. (1999) und Ishigaki und Miyao (1994), die beide eine entwicklungsbedingte Veränderung der dynamischen Sehschärfe bis zum Alter von 15 Jahren beschreiben. Der Unterschied zwischen den vorliegenden Ergebnissen und den Ergebnissen von Schrauf et al. mag in den Unterschieden im Versuchsaufbau begründet liegen. Schrauf et al. verwendeten eine Aufgabe mit *dynamischer Figur-Grund-Abhebung (form-from-motion)*<sup>17</sup>, welche sich insofern stark vom vorliegenden Versuchsaufbau unterscheidet, als sie

---

<sup>17</sup> Bei der dynamischen Figur-Grund-Abhebung wird eine Form dadurch wahrgenommen werden, dass sich die Pixel innerhalb der Form bewegen, während die Pixel des Hintergrundes stationär bleiben (Blanke et al., 2007).

abweichende visuelle Fähigkeiten (z.B. Formwahrnehmung) zugrunde legt und kein Verschieben des Aufmerksamkeitsfokus verlangt. Die Ergebnisse von Ishigaki und Miyao, deren Versuchsaufbau der vorliegenden Studie stärker ähnelte (auch sie verwendeten dynamische, helligkeitsdefinierte Reize), stehen nur auf den ersten Blick im Widerspruch zu den vorliegenden Ergebnissen. Sie zeigten zwar, dass die maximale Geschwindigkeit, bei der die Versuchspersonen die Position der Lücke in einem sich bewegenden Landolt-Ring erkennen können, bis zum Alter von 15 Jahren ansteigt. Gleichzeitig zeigten in dieser Studie bereits Fünfjährige bis zu der hohen Geschwindigkeit von 140°/s eine ähnliche Leistung wie Erwachsene. Diese Geschwindigkeit liegt jedoch weit über der maximalen Geschwindigkeit der Reize der vorliegenden Studie, sodass die stabile Leistung aller Altersgruppen, die hier beobachtet wurde, sich gut mit den Ergebnissen von Ishigaki und Miyao vereinbaren lässt. Die über den Altersverlauf hinweg stabile dynamische Sehschärfe ist ebenso gut vereinbar mit der Tatsache, dass die visuellen Fähigkeiten, von denen man annimmt, dass sie der dynamischen Sehschärfe zugrunde liegen, nämlich statische Sehschärfe (Nakatsuka et al., 2006) und Augenfolgebewegungen (Uchida, Kudoh, Murakami, Honda & Kitazawa, 2012), bereits mit 6 Jahren erwachsenenähnlich sind (Rütsche, Baumann, Jiang & Mojon, 2006; Schrauf et al., 1999; Simons, 1983; Skoczinski & Norcia, 2002).

#### **4.3.3 Alternative Erklärungen des Entwicklungsverlaufs – visuelle und motivationale Faktoren**

Neben der dynamischen Sehschärfe gibt es verschiedene weitere basale visuelle Fähigkeiten, die als notwendig für eine räumlich präzise Verarbeitung in der Object-Tracking-Aufgabe betrachtet werden können und die somit herangezogen werden könnten, um die entwicklungsbedingte Veränderung der Auflösung der Aufmerksamkeit im Kindesalter zu erklären. Neben der eben erwähnten Sehschärfe, die jedoch bereits mit 6 Jahren erwachsenenähnlich ist (z.B. Simons, 1983; vgl. 4.3.2) und somit nicht die Entwicklung der Auflösung der Aufmerksamkeit erklären kann, wäre die Kontrastsensitivität eine weitere grundlegende visuelle Fähigkeit, die der Entwicklung der Auflösung der Aufmerksamkeit zugrunde liegen könnte. In einer Reihe von Studien hat sich allerdings auch diese perzeptuelle Fähigkeit mit 6 Jahren als erwachsenenähnlich erwiesen (Adams & Courage, 2002; Ellemberg et al., 1999). Gleiches gilt für die Detektion von Bewegung, einer Subkomponente der Bewegungswahrnehmung (Thibault, Brosseau-Lachaine, Faubert & Vital-Durand, 2007). Im Gegensatz dazu unterscheidet sich die Leistung in einer anderen Subkomponente der Bewegungswahrnehmung, der Wahrnehmung der Bewegungsrichtung, bis zum 10. Lebensjahr von der von Erwachsenen (V. Armstrong, Maurer & Lewis, 2009; Bertone,

Hanck, Cornish & Faubert, 2008; Ellemberg et al., 2003). Eine Verbesserung dieser Fähigkeit könnte somit einen Teil der Leistungsveränderung der drei jüngeren Altersgruppen in der Object-Tracking-Aufgabe erklären. Es ist jedoch unwahrscheinlich, dass die verbesserte Wahrnehmung der Bewegungsrichtung den gesamten Entwicklungsverlauf der Auflösung der Aufmerksamkeit über alle Altersgruppen erklären kann, da die Entwicklungsverläufe der Wahrnehmung der Bewegungsrichtung und der Auflösung der Aufmerksamkeit nicht übereinstimmen. Während die Wahrnehmung der Bewegungsrichtung mit 10 Jahren erwachsenenähnlich ist, ist dies bei der in der vorliegenden Studie untersuchten Fähigkeit mit 13 Jahren noch nicht der Fall. Insgesamt deuten also die Unterschiede zwischen den Entwicklungsverläufen potentiell zugrunde liegender visueller Fähigkeiten und der Auflösung der Aufmerksamkeit darauf hin, dass die Entwicklung der Auflösung der Aufmerksamkeit nicht vorrangig durch die gleichzeitige Entwicklung visueller Fähigkeiten erklärt werden kann.

Ebenso ist es unwahrscheinlich, dass motivationale Faktoren die sich verbessernde Leistung in der Object-Tracking-Aufgabe erklären können. Hierauf weist erstens hin, dass die Leistung von Kindern und Erwachsenen bei großen Zielreiz-Distraktor-Abständen ähnlich ist und Unterschiede zwischen den Altersgruppen nur bei kleineren Abständen auftreten. Dies zeigt, dass die jüngeren Versuchsteilnehmer im Prinzip motiviert und in der Lage sind, sich für die erforderliche Zeitspanne auf die Aufgabe zu konzentrieren. Ihre Leistungseinbußen scheinen vielmehr auf den abnehmenden Zielreiz-Distraktor-Abstand zurückzuführen zu sein. Zweitens weist die stabile Leistung aller Altersgruppen über die beiden Experimentalhälften darauf hin, dass es auch den jüngsten Altersgruppen gelang, über das gesamte Experiment hinweg einen hohen Grad an Motivation aufrechtzuerhalten. Basierend auf diesen Beobachtungen kann also geschlossen werden, dass die geringere Leistung der Kinder in der Object-Tracking-Aufgabe nicht auf motivationale Faktoren zurückgeführt werden kann und dass die beobachteten entwicklungsbedingten Veränderungen der Auflösung der Aufmerksamkeit tatsächlich aufmerksamkeitsbezogen sind.

#### **4.3.4 Einbettung in die Forschung zur Entwicklung der Aufmerksamkeit**

Gemäß einer sich zunehmend klarer abzeichnenden Sichtweise innerhalb der Forschung zur Entwicklung der selektiven Aufmerksamkeit wird angenommen, dass die Fähigkeit zur Selektion im Prinzip schon ab einem frühen Alter gegeben ist, dass aber die Geschwindigkeit und Effizienz dieser grundlegenden Fähigkeit mit zunehmendem Alter ansteigt (Ristic & Kingstone, 2009; Scerif, 2010). Die vorliegenden Ergebnisse stützen diese Sichtweise. Gemäß den hier ermittelten Ergebnissen scheint Selektion an sich, also der Prozess, bei dem Teile des

visuellen Feldes hervorgehoben und andere ignoriert werden, nicht die Fähigkeit zu sein, die sich entwickelt. Hierfür spricht, dass in der Object-Tracking-Aufgabe Objekte, die zwar sichtbar sind, sich aber weit entfernt von den Zielreizen befinden (wie in den großen Abstandsbedingungen), sogar von der jüngsten Altersgruppe erfolgreich ignoriert werden können. Stattdessen scheint sich ein Aspekt der Effizienz, nämlich die Fähigkeit, die räumlichen Eigenschaften der Selektionsregion optimal anzupassen, zu verändern. Die vorliegenden Ergebnisse legen nahe, dass Kinder die Selektionsregion sogar dann nicht auf eine sehr kleine Fläche beschränken können, wenn ein „Überschwappen“ der Aufmerksamkeit auf benachbarte Objekte sowohl ineffizient als auch leistungsbeeinträchtigend ist.

Darüber hinaus könnte die hier beobachtete Entwicklung der Auflösung der Aufmerksamkeit ein weiteres Beispiel für einen generelleren Trend sein, der sich in immer mehr kognitiven Entwicklungsstudien abzeichnet, nämlich die Zunahme der Präzision kognitiver Repräsentationen mit zunehmendem Alter. Dieser Entwicklungstrend wurde in einer Reihe neuerer Studien zur Entwicklung des visuell-räumlichen Arbeitsgedächtnisses beobachtet. Diese zeigen, dass sich die Genauigkeit der Repräsentationen im Arbeitsgedächtnis in Bezug auf Orientierungen (Burnett Heyes et al., 2012) und Orte (Luna et al., 2004; Olesen et al., 2006; Schutte et al., 2003) mit zunehmendem Alter verbessert. Die kognitive Entwicklung scheint also durch eine zunehmende Genauigkeit der Repräsentation von Informationen gekennzeichnet zu sein und die Kombination der Ergebnisse der genannten Arbeitsgedächtnisstudien mit den Ergebnissen der vorliegenden Studie deutet darauf hin, dass diese zunehmende Genauigkeit ein allgemeines Prinzip ist, das auf verschiedenen Ebenen der Verarbeitungshierarchie zu beobachten ist.

#### **4.3.5 Zugrunde liegende Mechanismen**

Die Frage, welche Mechanismen der Entwicklung der Auflösung der Aufmerksamkeit zugrunde liegen, ist der Inhalt der weiteren Dissertation und es wird hierzu an dieser Stelle auf die Ausführungen im Theorieteil und die nachfolgenden Kapitel verwiesen. Zur Beantwortung dieser Frage werden dort jedoch vor allem Faktoren betrachtet, die sich auf den gesamten Entwicklungsverlauf der Auflösung der Aufmerksamkeit beziehen. Die starke Veränderung der Auflösung der Aufmerksamkeit zwischen 7 und 9 Jahren könnte jedoch auf einen zeitlich eher eng umgrenzten und zudem umweltbedingten Faktor zurückzuführen sein, nämlich den Erwerb der Lesefähigkeit. Lesen erfordert eine räumlich enge Fokussierung der selektiven visuellen Aufmerksamkeit (Stevens & Bavelier, 2012) und es ist davon auszugehen, dass Leseanfänger dazu gezwungen sind, ihre Aufmerksamkeit erstens auf

kleinere Bereiche zu fokussieren und dies zweitens über längere Zeitspannen tun müssen, als dies bisher der Fall war. Es gibt Hinweise darauf, dass der Leseerwerb die Effizienz der visuellen Suche erhöht und die räumlichen Eigenschaften des Aufmerksamkeitsfokus verändert (Ferretti, Mazzotti & Brizzolara, 2008). In ähnlicher Weise könnte zunehmende Übung im Lesen dazu führen, dass der Fokus der Aufmerksamkeit zunehmend eng zusammengezogen werden kann. Diese Hypothese ist bisher jedoch noch nicht überprüft worden. Hierzu könnte ein Vergleich der Entwicklung der Auflösung der Aufmerksamkeit von Kindern aus unterschiedlichen Ländern (und damit unterschiedlichen Zeitpunkten, zu denen mit dem Lesen begonnen wird), ein sinnvoller Zugang sein. Eine Koinzidenz des Lesebeginns mit einer starken Entwicklungsveränderung der Auflösung der Aufmerksamkeit wäre ein deutlicher Indikator für einen Zusammenhang zwischen diesen beiden Faktoren.

Während der Leseerwerb die starke Verbesserung der Auflösung der Aufmerksamkeit zwischen dem 7. und 9. Lebensjahr zumindest teilweise erklären könnte, kann die weitere Entwicklung, vor allem die zweite deutliche Veränderung zwischen 13 Jahren und dem Erwachsenenalter kaum mit der Verbesserung der Lesefähigkeiten erklärt werden und steht vermutlich eher mit den Faktoren im Zusammenhang, die im weiteren Verlauf der Arbeit behandelt werden.

#### **4.3.6 Schlussfolgerung**

Diese Untersuchung zeigt, dass sich die Auflösung der Aufmerksamkeit zwischen dem 7. Lebensjahr und dem Erwachsenenalter bedeutsam verbessert. Diese Entwicklung ist charakterisiert durch zwei Entwicklungssprünge – einen zwischen dem 7. und dem 9. Lebensjahr und einen zwischen dem 13. Lebensjahr und dem Erwachsenenalter – und eine gleichbleibende Auflösung der Aufmerksamkeit zwischen 11 und 13 Jahren. Das Ausmaß der Entwicklungsveränderung ist erheblich: Während der späten Kindheit und frühen Adoleszenz ist der kritische Abstand, der nötig ist, um zwei Objekte individuieren zu können, noch doppelt so groß wie bei Erwachsenen, in der mittleren Kindheit ist er sogar dreimal so groß. Die für das Säuglingsalter verwendete Metapher einer Laterne der Aufmerksamkeit (Farzin et al., 2010) trifft also, wenn auch in geringerem Maße, in der Kindheit und im frühen Jugendalter weiter zu. Die Veränderung der Auflösung der Aufmerksamkeit kann nicht durch eine gleichzeitige Entwicklung der dynamischen Sehschärfe oder anderer grundlegender visueller oder motivationaler Faktoren erklärt werden. Mit der Frage, welche Faktoren der Entwicklung der Auflösung der Aufmerksamkeit tatsächlich zugrunde liegen könnten, setzen sich die folgenden Kapitel auseinander.



## **5 Experiment 2: Einfluss der Verarbeitungskapazität auf die Entwicklung der Auflösung der Aufmerksamkeit**

Mit Experiment 2 sollte untersucht werden, ob die in Experiment 1 beobachtete Entwicklung der Auflösung der Aufmerksamkeit auf entwicklungsbedingte Unterschiede in der Verarbeitungskapazität zurückzuführen ist. Zur Beantwortung dieser Fragestellung absolvierten die Versuchspersonen eine MOT-Aufgabe, in der zusätzlich zum Abstand zwischen Zielreiz und Distraktoren die Anzahl der Zielreize variiert wurde. Außerdem wurde je eine Aufgabe zur visuell-räumlichen Arbeitsgedächtnis- und Kurzzeitgedächtniskapazität vorgegeben, deren Ergebnisse auf intraindividueller Basis mit den Ergebnissen der MOT-Aufgabe in Bezug gesetzt wurden. Es folgt die detaillierte Beschreibung der verwendeten Methodik (5.1). Anschließend werden die resultierenden Ergebnisse dargestellt (5.2) und diskutiert (5.3).

### **5.1 Methode**

In diesem Abschnitt wird das methodische Vorgehen, das zur Beantwortung der eingangs formulierten Fragestellung verwendet wurde, beschrieben. Die Abfolge der Darstellung orientiert sich hierbei an der von Experiment 1.

#### **5.1.1 Operationalisierung und Design**

In Experiment 2 wurden die gleichen Altersgruppen wie in Experiment 1 untersucht, da die in Experiment 1 beobachtete Entwicklungsveränderung der Auflösung der Aufmerksamkeit erklärt werden sollte. Somit wurden wieder sieben-, neun- und elfjährige Kinder, dreizehnjährige Jugendliche sowie Erwachsene getestet.

Im Folgenden wird zunächst die Operationalisierung der Hypothese, die den Einfluss der Load auf die Auflösung der Aufmerksamkeit beschreibt, vorgenommen und anschließend die Operationalisierung der visuell-räumlichen Arbeits- und Kurzzeitgedächtniskapazität beschrieben.

#### ***Einfluss der Load auf die Auflösung der Aufmerksamkeit***

##### ***Versuchsaufbau***

Mit Experiment 2 sollte der Einfluss einer Variation der Load auf die Auflösung der Aufmerksamkeit in den verschiedenen Altersgruppen untersucht werden. Die Auflösung der Aufmerksamkeit wurde wie in Experiment 1 durch eine Variation des Zielreiz-Distraktor-Abstandes in einem Object-Tracking-Experiment und eine anschließende Bestimmung des kritischen Abstandes ermittelt. Die Variation der Load wurde hergestellt durch eine Variation

der Anzahl der Zielreize, die gleichzeitig zu verfolgen waren. Konkret wurden die Bedingungen zwei und drei Zielreize realisiert. Die ausschließliche Verwendung von Bedingungen mit mehr als einem Zielreiz hatte zwei Gründe. Erstens muss, im Gegensatz zu Durchgängen mit nur einem Zielreiz, sowohl bei zwei als auch drei Zielreizen der Fokus der Aufmerksamkeit geteilt werden, sodass sich dieser Faktor zwischen den Bedingungen nicht unterscheidet. Zweitens ist sowohl bei zwei als auch bei drei Zielreizen davon auszugehen, dass die visuelle Verarbeitung der Zielreize nicht mehr durch die zentrale Fovea abgedeckt werden kann.<sup>18</sup> Von mehr als drei Zielreizen wurde abgesehen, da frühere Studien gezeigt haben, dass die jüngeren Kinder im untersuchten Altersbereich nicht in der Lage sind, mehr als drei Zielreize zu verfolgen (Trick et al., 2009; Trick et al., 2005).

Die Auswahl der realisierten Abstandsbedingungen orientierte sich an den Ergebnissen von Experiment 1. Es wurde nicht versucht, alle möglichen Abstandsbedingungen in allen Altersgruppen zu testen, sondern vielmehr für die verschiedenen Altersgruppen und Zielreizanzahlen den Bereich zu testen, in dem der kritische Abstand zu erwarten war. Konkret wurden für die Sieben- und Neunjährigen Zielreiz-Distraktor-Abstände von 5.33 bis 12 Winkelminuten bei zwei Zielreizen und von 6.67 bis 10.67 Winkelminuten bei drei Zielreizen, für Elf- und Dreizehnjährige Abstände von 4 bis 12 Winkelminuten bei zwei Zielreizen und von 4 bis 10.67 Winkelminuten bei drei Zielreizen und für Erwachsene Abstände von 2 bis 12 Winkelminuten bei zwei Zielreizen und von 2 bis 10.67 Winkelminuten bei drei Zielreizen realisiert. Die Abstandsbedingung 12 Winkelminuten bei drei Zielreizen wurde nicht getestet, da in den Durchgängen mit drei Zielreizen unter den für die Zielreize festgelegten Randbedingungen (vgl. 5.1.4) keine Durchgänge für diese Bedingung hergestellt werden konnten.

Das Experiment wies ein dreifaktorielles Design auf. Hierbei wurde der erste Faktor Altersgruppe interindividuell variiert und der zweite Faktor Anzahl Zielreize wurde intraindividuell variiert. Ebenfalls intraindividuell variiert wurde der Faktor Abstand, der jedoch in Abhängigkeit vom Alter und der Anzahl der Zielreize in einer unterschiedlichen Anzahl an Ausprägungen auftrat. Tabelle 5.1 fasst das Design der MOT-Aufgabe zusammen.

---

<sup>18</sup> Nichtsdestotrotz ist aufgrund der geringen Größe des Trackingfeldes davon auszugehen, dass die Zielreize immer noch foveal verarbeitet werden.

Tabelle 5.1: Versuchsplan des MOT-Experiments mit den Faktoren Altersgruppe, Anzahl Zielreize und Abstand.

		UV B: Anz. Ziel- reize	UV C: Abstand									
			2	2.67	3.33	4	5.33	6.67	8	9.33	10.67	12
UV A: Altersgruppe	7	2					Y <sub>i111</sub>	Y <sub>i112</sub>	Y <sub>i113</sub>	Y <sub>i114</sub>	Y <sub>i115</sub>	Y <sub>i116</sub>
		3						Y <sub>i121</sub>	Y <sub>i122</sub>	Y <sub>i123</sub>	Y <sub>i124</sub>	
	9	2					Y <sub>i211</sub>	Y <sub>i212</sub>	Y <sub>i213</sub>	Y <sub>i214</sub>	Y <sub>i215</sub>	Y <sub>i216</sub>
		3						Y <sub>i221</sub>	Y <sub>i222</sub>	Y <sub>i223</sub>	Y <sub>i224</sub>	
	11	2				Y <sub>i311</sub>	Y <sub>i312</sub>	Y <sub>i313</sub>	Y <sub>i314</sub>	Y <sub>i315</sub>	Y <sub>i316</sub>	Y <sub>i317</sub>
		3				Y <sub>i321</sub>	Y <sub>i322</sub>	Y <sub>i323</sub>	Y <sub>i324</sub>	Y <sub>i325</sub>	Y <sub>i326</sub>	
	13	2				Y <sub>i411</sub>	Y <sub>i412</sub>	Y <sub>i413</sub>	Y <sub>i414</sub>	Y <sub>i415</sub>	Y <sub>i416</sub>	Y <sub>i417</sub>
		3				Y <sub>i421</sub>	Y <sub>i422</sub>	Y <sub>i423</sub>	Y <sub>i424</sub>	Y <sub>i425</sub>	Y <sub>i426</sub>	
	Erw.	2	Y <sub>i511</sub>	Y <sub>i512</sub>	Y <sub>i513</sub>	Y <sub>i514</sub>	Y <sub>i515</sub>	Y <sub>i516</sub>	Y <sub>i517</sub>	Y <sub>i518</sub>	Y <sub>i519</sub>	Y <sub>i5110</sub>
		3	Y <sub>i521</sub>	Y <sub>i522</sub>	Y <sub>i523</sub>	Y <sub>i524</sub>	Y <sub>i525</sub>	Y <sub>i526</sub>	Y <sub>i527</sub>	Y <sub>i528</sub>	Y <sub>i529</sub>	

Anmerkungen. UV, unabhängige Variable.

Als Antwortformat wurde wie in Experiment 1 das Probe-One-Format (Hulleman, 2005) verwendet.

#### Statistische Auswertung

Die Genauigkeitsdaten der Teilnehmer wurden aggregiert, indem pro Versuchsperson für alle realisierten Bedingungen der Anteil korrekter Antworten berechnet wurde. Zu deskriptiven Zwecken wurden anschließend die absoluten Schwellenwerte der verschiedenen Altersgruppen, getrennt für zwei und drei Zielreize, berechnet. Hierzu wurden, analog zu Experiment 1 (vgl. 4.1.1), die Daten pro Abstandsbedingung über alle Versuchspersonen einer Altersgruppe gepoolt und mittels lokaler linearer Regression (Zychaluk & Foster, 2009) der absolute Schwellenwert (entsprechend einer Leistung von 75 %) der Altersgruppe berechnet. Ebenfalls wie in Experiment 1 wurden mittels Bootstrapping (10000 Resamplings) Konfidenzintervalle (Efron & Tibshirani, 1993) um die Schwellenwerte gelegt, deren korrigierte Überdeckungswahrscheinlichkeit jeweils im Kontext der betreffenden Analyse vermerkt ist.

Zur Vorbereitung der inferenzstatistischen Auswertung wurden Schwellenwerte für jede einzelne Versuchsperson berechnet. Hierzu wurde zunächst versucht, die individuellen Schwellen analog der Vorgehensweise für die Gesamtgruppe mittels lokaler linearer

Regression zu bestimmen. Da der Algorithmus bei einem hohen Anteil der Versuchspersonen nicht konvergierte, wurde jedoch ein alternativer Ansatz zur Bestimmung der individuellen Schwellen gewählt. Es wurden für jede Versuchsperson und Zielreizanzahl, ausgehend von der leichtesten Abstandsbedingung und in Richtung der schwereren Abstandsbedingungen fortschreitend, die Trefferraten in jeder Bedingung betrachtet und geprüft, wann die Trefferrate das erste Mal unter 83 % fiel. Die nächstleichtere Abstandsbedingung wurde als Schwelle für die betreffende Person definiert. Der Wert von 83 % wurde gewählt, da er von den möglichen Genauigkeitswerten, die eine einzelne Person in einer Abstandsbedingung erreichen konnte (wegen sechs Durchgängen: 17 %, 34 %, 50 %, 67 %, 83 %, 100 %), gleichzeitig möglichst nahe an den 75 % lag, die als Schwellenwert für die lokale lineare Regression verwendet wurden, und weiter über der Ratewahrscheinlichkeit lag als die prinzipiell genauso weit von 75 % entfernten 67 %. Unterschritt eine Versuchsperson bereits in der leichtesten Abstandsbedingung eine Trefferrate von 83 %, wurde ihr als Schwelle der Wert 5 Winkelminuten zugeordnet. Hatte eine Versuchsperson noch in der schwersten ihr dargebotenen Bedingung eine Trefferrate von über 83 %, wurde ihr die nächstschwierigere Abstandsbedingung als Schwelle zugeordnet. Im Falle der Erwachsenen wurde hierfür der Wert 1.33 Winkelminuten gewählt. Wie in 5.2.1 dargestellt und begründet wurden die Daten der Siebenjährigen nach der deskriptiven Analyse aus der weiteren Auswertung ausgeschlossen.

Mit den individuellen Schwellenwerten wurde zunächst explorativ eine zweifaktorielle ANOVA mit Messwiederholung mit dem Zwischensubjektfaktor Altersgruppe und dem Messwiederholungsfaktor Anzahl Zielreize gerechnet. Signifikante Haupteffekte wurden mit Post-hoc-Vergleichen (Adjustierung der kritischen Werte für die multiplen Paarvergleiche mit der Bonferroni-Korrektur des SPSS-Paketes) weiter analysiert. Mit post-hoc *t*-Tests für abhängige Stichproben wurde zudem innerhalb der einzelnen Altersgruppen geprüft, inwieweit sich die mittleren Schwellenwerte für zwei vs. drei Zielreize unterschieden. Hierbei wurde die Irrtumswahrscheinlichkeit der einzelnen Tests mit der Bonferroni-Methode für multiple Vergleiche korrigiert. Die empirische Effektstärke der post-hoc *t*-Tests wurde als Korrelationskoeffizient mit folgender Formel berechnet (Rosnow & Rosenthal, 2003):

$$r_{\text{äquivalent}} = \sqrt{F / (F + df)} \quad (2)$$

Zur Beurteilung von Hypothese 3 wurde für jede Person die Differenz aus den individuellen Schwellenwerten bei zwei und drei Zielreizen gebildet. Bezüglich des Verlaufs dieser

Differenzwerte über die Altersgruppen hinweg wurde in Hypothese 3 postuliert, dass die jeweilige Höhe dieser Differenzwerte der in Experiment 1 ermittelten Auflösung der Aufmerksamkeit der jeweiligen Altersgruppe entsprechen sollte. Die Entsprechung der beiden Verläufe (also ob die Werte der Schwellenwert-Differenz der verschiedenen Altersgruppen den Entwicklungsverlauf des kritischen Abstandes aus Experiment 1 widerspiegeln) wurde mit einer Kontrastanalyse überprüft. Bei diesem Verfahren wird eine spezifische Hypothese über den Verlauf von statistischen Kennwerten über mehrere Stufen eines Faktors mithilfe von Kontrastkoeffizienten ausgedrückt, die so festgelegt werden, dass sie die inhaltliche Hypothese widerspiegeln (Eid et al., 2010). Die Bestimmung der hypothetischen Kontrastkoeffizienten für die vorliegende Untersuchung fand in mehreren Schritten statt (Sedlmeier & Renkewitz, 2008). Zunächst wurden für jede Altersgruppe die hypothetischen Schwellenwerte auf der Grundlage der empirischen Schwellenwerte der Altersgruppen in Experiment 1 spezifiziert (vgl. 4.2.1). Der Verlauf der Schwellenwerte in Experiment 1 war durch eine signifikante Verringerung des kritischen Abstandes zwischen 9 und 11 Jahren, ein Plateau zwischen 11 und 13 Jahren und eine weitere signifikante Verringerung zwischen 13 Jahren und dem Erwachsenenalter gekennzeichnet. Zur Vereinfachung des aus Experiment 1 abgeleiteten Entwicklungsverlaufs wurde der leichte Anstieg des kritischen Abstandes zwischen 11 und 13 Jahren nivelliert, indem die Schwellenwerte für 11 und 13 Jahre durch den Mittelwert der beiden Werte ersetzt wurde ( $((4.96 + 5.78)/2 = 5.37)$ ). Im nächsten Schritt wurden zur Vereinfachung der Werte die Schwellenwerte der einzelnen Altersgruppen zur nächsten ganzen oder halben Zahl auf- oder abgerundet. Es resultierten (in aufsteigender Altersreihenfolge für die Neunjährigen bis Erwachsenen) die hypothetischen Schwellenwerte 6.5, 5.5, 5.5 und 3.5 Winkelminuten. Anschließend wurde der Gesamtmittelwert der hypothetischen Schwellenwerte gebildet (5.25) und dieser Gesamtmittelwert von den einzelnen hypothetischen Schwellenwerten abgezogen. Die resultierenden Kontrastkoeffizienten für die verschiedenen Altersgruppen lauteten in aufsteigender Altersreihenfolge: 1.25, 0.25, 0.25, -1.75. Diese Kontrastkoeffizienten bilden nun den hypothetischen Kontrast  $\Lambda$ , der im Folgenden mit dem Stichprobenkontrast  $L$  verglichen werden sollte (zur Notation siehe Eid et al., 2010). Die Effektgröße der Kontrastanalyse  $r_{effect\ size}$  wurde als Korrelation zwischen den aktuellen Schwellenwert-Differenzen und den vorhergesagten Kontrastkoeffizienten berechnet (Sedlmeier & Renkewitz, 2008).

Zur nachträglichen genaueren Analyse des komplexen Kontrastes wurden post-hoc  $t$ -Tests für unabhängige Stichproben (Eid et al., 2010) gerechnet, die Aufschluss darüber geben sollten, ob sich die jeweils benachbarten Altersgruppen in ihren Schwellenwert-Differenzen

signifikant unterschieden. Die Irrtumswahrscheinlichkeit der einzelnen Paarvergleiche wurde mit der Bonferroni-Methode für multiple Vergleiche korrigiert, die empirische Effektstärke der post-hoc *t*-Tests wurde als Korrelationskoeffizient nach Rosnow und Rosenthal (2003) berechnet.

### ***Visuell-räumliche Arbeitsgedächtniskapazität***

#### *Versuchsaufbau*

Die visuell-räumliche Arbeitsgedächtniskapazität wurde – im Gegensatz zu anderen Aspekten der Arbeitsgedächtniskapazität – bisher relativ selten untersucht und es gibt keine konventionelle Vorgehensweise zur ihrer Messung (Lecerf & Roulin, 2006). Eine Gemeinsamkeit aller bisher entwickelten visuell-räumlichen Arbeitsgedächtnisaufgaben ist, dass es sich dabei um die Kombination zweier Aufgaben handelt, von denen die eine Aufgabe eine Speicherung visuell-räumlicher Informationen und die andere Aufgabe die Verarbeitung von Informationen erfordert (Daneman & Carpenter, 1980). Typischerweise sind diese Aufgaben abwechselnd angeordnet, sodass der Speicherung von Informationen eine Verarbeitungsphase folgt, woraufhin wieder neues Material eingespeichert wird, usw. (z.B. Vergauwe, Barrouillet & Camos, 2009). In den meisten Fällen wird in der Speicheraufgabe eine Einspeicherung von Positionen innerhalb einer Matrix gefordert (z.B. Kane et al., 2004; Y. Lee, Lu & Ko, 2007), die meist sequentiell, unterbrochen jeweils von einer Verarbeitungsphase, dargeboten werden (siehe jedoch Vecchi, Monticellai & Cornoldi, 1995). Dabei wird das zu memorierende Material teilweise direkt dargeboten (z.B. Y. Lee et al., 2007), teilweise wird es durch einen Verarbeitungsvorgang der Person hergestellt (Lecerf & Roulin, 2006; Oberauer, Süß, Schulze, Wilhelm & Wittmann, 2000). Eine alternative Speicheraufgabe ist das Memorieren von einer oder mehreren Richtungen oder Pfaden (Kane et al., 2004; Shah & Miyake, 1996). Typischerweise wird die Menge der zu memorierenden Orte bzw. Pfade (und damit der Speicher-/Verarbeitungsdurchgänge) im Laufe des Experiments gesteigert, um die Menge der Informationen herauszufinden, die maximal erinnert werden können. Große Variationen hinsichtlich des Materials und der Aufgabe gibt es in der Verarbeitungsphase. Während einige Aufgaben eine (weitere) Verarbeitung des zu merkenden Materials erfordern (Lecerf & Roulin, 2006; Oberauer et al., 2000), verlangen andere Studien die Bearbeitung anderen Materials. Hierbei kann es sich beispielweise um anderes visuell-räumliches Material (z.B. Vecchi et al., 1995; Vergauwe et al., 2009) oder das Lösen von Gleichungen (z.B. Kane et al., 2004; Shah & Miyake, 1996) handeln.

Für die vorliegende Untersuchung wurde eine Aufgabe (im Folgenden: *Matrix-Aufgabe*) konzipiert, die teilweise Elemente vorhandener Aufgaben übernimmt, teilweise neue

Elemente enthält. Es wurde hier, wie in den meisten Aufgaben zum visuell-räumlichen Arbeitsgedächtnis, eine Aufgabe verwendet, die das Erinnern einer oder mehrerer Positionen innerhalb einer quadratischen Matrix erfordert (z.B. Kane et al., 2004; Y. Lee et al., 2007). Dieser Aufgabentyp ist vielfach erprobt und weist konzeptionell eine hohe Ähnlichkeit zum Corsi-Block-Test auf, mit dem in der vorliegenden Studie die visuell-räumliche Kurzzeitgedächtniskapazität ermittelt wurde. Die zu memorierenden Orte wurden hier, ebenfalls analog zu den meisten derartigen Studien, sequentiell, d.h. getrennt durch jeweils eine Verarbeitungseinheit, dargeboten. Im Unterschied zu vielen derartigen Aufgaben wurden die zu memorierenden Orte in der vorliegenden Studie nicht direkt gezeigt, sondern mussten selbst „erarbeitet“ werden (vgl. Lecerf & Roulin, 2006; Oberauer et al., 2000). Dieses Element stellte die Verarbeitungskomponente der Arbeitsgedächtnisaufgabe dar, wobei hier das zu erinnernde Material auch Bestandteil des Verarbeitungsvorgangs war. Hiermit sollte die Komplexität der Aufgabe im Rahmen gehalten werden, indem vermieden wurde, dass die Kinder sich auf zwei völlig getrennte Aufgaben konzentrieren mussten. Konkret sollten die Versuchspersonen im Rahmen der Verarbeitungskomponente Pfade aus drei Schritten innerhalb der Matrix gehen, wobei die Richtung der Schritte durch vier unterschiedliche Töne, die jeweils einer Bewegungsrichtung zugeordnet waren, vorgegeben wurde. Der Endpunkt des Pfades, das *Zielfeld*, war zu memorieren. Es handelt sich bei dieser Aufgabe also um eine, bei der eine mentale Vorstellung zu generieren ist (Brooks, 1967; Kosslyn, 1980). Hierbei wird angenommen, dass dieses mentale Bild im visuell-räumlichen Arbeitsgedächtnis gespeichert wird (Vecchi et al., 1995). Falls in dem Durchgang mehrere Orte zu merken waren, schloss sich an das Einprägen des Zielfeldes ein neues Bewegen durch die Matrix an. Am Ende eines Durchgangs wurden innerhalb der Matrix so viele Kästchen markiert, wie Orte zu merken waren. In der Hälfte der Fälle stimmte die Markierung mit dem Zielfeld bzw. den Zielfeldern überein, in der anderen Hälfte der Fälle wich sie davon ab. Die Probanden sollten nun durch Tastendruck angeben, ob die gezeigten Markierungen den Zielfeldern entsprachen. Damit wurde ein einfaches Antwortformat verwendet, das eine schnelle Antwort erlaubt (und damit einem Verfall der Informationen während der Antwortphase entgegenwirkt) und den Einsatz der Computermouse vermeidet (vgl. 4.1.1). Pro Sequenzlänge wurden vier Durchgänge dargeboten und die Länge der Sequenzen wurde nach und nach gesteigert. Der Versuch wurde so lange fortgeführt, wie die Probanden für eine Anzahl zu memorierender Felder mindestens Ratewahrscheinlichkeit (d.h. zwei richtige Antworten) erreichten.

### *Statistische Auswertung*

Aus der Matrix-Aufgabe wurde als Kennwert die Summe der korrekten Antworten während der gesamten Aufgabe ermittelt. Dieser Kennwert soll hier als *Matrix-Gesamtscore* bezeichnet werden. Mit dem Matrix-Gesamtscore wurde eine einfaktorielle ANOVA mit dem Faktor Altersgruppe gerechnet. Zur genaueren Analyse der Haupteffekte wurden Post-hoc-Vergleiche gerechnet, deren kritische Werte für multiple Paarvergleiche mit der Bonferroni-Korrektur des SPSS-Paketes korrigiert wurden. Zudem wurden die in der Matrix-Aufgabe ermittelten Werte jeder Person mit einer Pearson-Korrelation mit den Schwellenwert-Differenzen der MOT-Aufgabe in Beziehung gesetzt. Zusätzlich wurden Partialkorrelationen zwischen der Schwellenwert-Differenz und dem Matrix-Gesamtscore unter Auspartialisierung der Altersgruppenzugehörigkeit berechnet.

### ***Visuell-räumliche Kurzzeitgedächtniskapazität***

#### *Versuchsaufbau*

Das visuell-räumliche Kurzzeitgedächtnis wurde in der vorliegenden Untersuchung mit dem *Corsi-Block-Test* (Corsi, 1972; Milner, 1971) untersucht. Hier haben die Probanden die Aufgabe, Blöcke, die auf einem Brett angeordnet sind, in der gleichen Reihenfolge anzutippen, wie es vom Versuchsleiter demonstriert wurde (Kessels, van den Berg, Ruis & Brands, 2008). Dabei wird die Länge der Sequenzen nach und nach gesteigert und mit der längsten Sequenz, die die Probanden korrekt wiederholen können, die *Blockspanne* ermittelt. Dieser Test ist, zusammen mit dem *Visuellen-Muster-Test* (Della Sala, Gray, Baddeley, Allamano & Wilson, 1999) die am häufigsten verwendete Aufgabe zur Untersuchung der visuell-räumlichen Kurzzeitgedächtniskapazität (Kessels et al., 2008; Kessels, van Zandvoort, Postma, Kappelle & de Haan, 2000) und wurde zudem bereits häufig im Entwicklungskontext eingesetzt (Pickering, 2001). Daneben wurde der Corsi-Block-Test für die vorliegende Untersuchung ausgewählt, da es sich dabei um eine Aufgabe mit motorischen Anteilen handelt, und sie somit Abwechslung im Untersuchungsablauf bot, der sonst vor allem Anteile am PC besaß. Es wurde angenommen, dass sich diese Abwechslung vor allem für die jüngeren Teilnehmer motivationssteigernd auswirken würde.

### *Statistische Auswertung*

In der vorliegenden Untersuchung wurden im Corsi-Block-Test gemäß der von Kessels et al. (2000) vorgeschlagenen Standardisierung zwei Sequenzen pro Länge dargeboten und jede komplett korrekt wiederholte Sequenz mit einem Punkt bewertet. Für jeden Probanden wurde als Maßzahl für die visuell-räumliche Kurzzeitgedächtniskapazität der *Corsi-Gesamtscore* als Produkt aus der Blockspanne und der Anzahl korrekter Durchgänge bestimmt. Dieser von



Kessels et al. (2000) vorgeschlagene Kennwert wird hier verwendet, da er die Leistung beider Durchgänge einer Länge berücksichtigt und daher eine höhere Reliabilität als die Blockspanne aufweist (Kessels et al., 2000).

Mit den Corsi-Gesamtscore-Werten der einzelnen Versuchspersonen wurden im Anschluss die gleichen inferenzstatistischen und korrelativen Berechnungen wie für den Matrix-Gesamtscore durchgeführt.

### 5.1.2 Statistische Hypothesen

Nach der Operationalisierung der psychologischen Hypothesen kann nun die Formulierung der statistischen Hypothesen vorgenommen werden.

#### *Hypothese 3*

Hypothese 3 besagt, dass die Veränderung der Auflösung der Aufmerksamkeit mit zunehmender Load den Entwicklungsverlauf der Auflösung der Aufmerksamkeit aus Experiment 1 abbildet. Als statistischer Kennwert für die Veränderung der Auflösung der Aufmerksamkeit wurde die Differenz der (gemäß der Beschreibung unter 5.1.1 gebildeten) individuellen Schwellenwerte bei zwei vs. drei Zielreizen verwendet. Der (vereinfachte) Entwicklungsverlauf, den diese Werte nachbilden sollten, wurde unter ebenfalls unter 5.1.1 beschrieben. Die entsprechende statistische Hypothese lautete:

**H3:** Die Schwellenwert-Differenz ( $SW_{diff}$ ) nimmt zwischen 9 und 11 Jahren ab, ist zwischen 11 und 13 Jahren stabil und nimmt zum Erwachsenenalter hin nochmals ab. Formal wird dies in folgendem komplexen Kontrast abgebildet:

$$\Lambda = 1.25 \cdot SW_{diff9} + 0.25 \cdot SW_{diff11} + 0.25 \cdot SW_{diff13} + (-1.75) \cdot SW_{diffErw} \quad (3)$$

Das  $\alpha$ -Niveau für den gesamten komplexen Kontrast betrug 5 % (einseitig).

#### *Hypothese 4 und 5*

Gemäß Hypothese 4 und 5 besteht intraindividuell ein negativer Zusammenhang zwischen der Veränderung der Auflösung der Aufmerksamkeit mit zunehmender Load und den Maßen des visuell-räumlichen Arbeitsgedächtnisses bzw. Kurzzeitgedächtnisses. Als statistischer Kennwert der Veränderung der Auflösung der Aufmerksamkeit wurde hier wieder die Schwellenwert-Differenz verwendet, als Kennwert der Matrix-Aufgabe wurde der Matrix-Gesamtscore und als Kennwert der Corsi-Block-Aufgabe der Corsi-Gesamtscore verwendet. Die entsprechenden statistischen Hypothesen lauten:

**H4:** Die Korrelation zwischen der Schwellenwert-Differenz und dem Matrix-Gesamtscore liegt signifikant unter Null.

**H5:** Die Korrelation zwischen der Schwellenwert-Differenz und dem Corsi-Gesamtscore liegt signifikant unter Null.

Das  $\alpha$ -Niveau für die beiden Hypothesen betrug jeweils 5 % (einseitig).

### **5.1.3 Versuchspersonen**

An der Untersuchung nahmen 115 Personen zwischen 6 und 32 Jahren teil. Die Stichprobe setzte sich aus fünf Altersgruppen mit je 23 Teilnehmern zusammen: Siebenjährigen (entsprechend der Klassenstufe 1; 11 männlich, mittleres Alter 6.8 Jahre, Spannweite 6.3-7.6 Jahre), Neunjährigen (Klassenstufe 3; 12 männlich, mittleres Alter 8.8 Jahre, Spannweite 8.2-9.4 Jahre), Elfjährigen (Klassenstufe 5; 12 männlich, mittleres Alter 10.8 Jahre, Spannweite 10.2-11.5 Jahre), Dreizehnjährigen (Klassenstufe 7; 11 männlich, mittleres Alter 13.0 Jahre, Spannweite 12.0-13.8 Jahre) und Erwachsenen (12 männlich, mittleres Alter 25.7 Jahre, Spannweite 20.0-32.3 Jahre). Vier weitere Teilnehmer aus der ersten Klasse wurden nach der Datenerhebung von der weiteren Datenauswertung ausgeschlossen, weil sie entweder das Experiment abgebrochen hatten (drei Probanden) oder weil sie die Aufgabenstellung nicht verstanden hatten (ein Proband). Alle Teilnehmer wiesen eine korrigierte oder unkorrigierte Sehschärfe von mindestens 1.0 auf (gemessen mit einer konventionellen Landolt-Sehtafel, Schairer, Stuttgart) und hatten keine sonstigen Seheinschränkungen.

Mit einem analogen Vorgehen wie in Experiment 1 wurde in den einzelnen Altersstichproben die schulische Leistungsspanne eines Jahrgangs gleichmäßig abgedeckt, sodass schließlich je ein Drittel der Teilnehmer jeder Altersstufe dem unteren, mittleren bzw. oberen schulischen Leistungsbereich des Jahrgangs entstammte. Die sieben- und neunjährigen Teilnehmer waren Schüler der Martinusschule Bad Orb und wurden rekrutiert, indem ihnen durch die Lehrkräfte gezielt Elternbriefe ausgeteilt wurden. Die elf- und dreizehnjährigen Teilnehmer waren Schüler der Friedrich-August-Genth-Schule Wächtersbach, die sich auf eine Vorstellung des Experimentes in ihren Klassen hin zu einer Teilnahme an der Untersuchung bereit erklärten. Die Erwachsenen waren Bekannte der Versuchsleiter. Alle Versuchsteilnehmer erhielten für ihre Teilnahme eine Süßigkeit oder ein kleines Geschenk. Sie bzw. ihre Eltern erklärten sich vorab schriftlich mit der Teilnahme an der Studie einverstanden.

#### **5.1.4 Material und Stimuli**

Die PC-gestützten Untersuchungsteile wurden mit derselben technischen Ausstattung und denselben Einstellungen wie Experiment 1 durchgeführt. Abweichungen sind im Kontext der jeweiligen Aufgaben vermerkt.

##### ***MOT-Experiment***

Im MOT-Experiment wurden dieselben Stimuli wie in Experiment 1 verwendet. Ebenso bewegten sich die Punkte nach dem unter Experiment 1 beschriebenen Bewegungsmuster (vgl. 4.1.4). Der minimale Abstand zwischen Zielreizen und Distraktoren wurde zwischen den verschiedenen Durchgängen in den in 5.1.1 beschriebenen Abstufungen variiert. Wie in Experiment 1 betrug der minimale Abstand zwischen zwei Distraktoren in allen Bedingungen 4 Winkelminuten.

Um eine möglichst vergleichbare Bewegung der Zielreize in den unterschiedlichen Abstandsbedingungen herzustellen, wurden, wie in Experiment 1, auch hier drei weitere Kriterien für die Bewegung der Zielreize festgelegt. Diese Kriterien betrafen wieder die Anzahl der Aufeinandertreffen mit anderen Objekten, die Anzahl der Aufeinandertreffen mit der Wand und die Anzahl der durchlaufenen Quadranten (vgl. 4.1.4). Da in Experiment 2 jedoch mehrere Zielreize gleichzeitig diese Bedingungen erfüllen mussten, war wahrscheinlichkeitsbedingt die Anzahl der Durchgänge, die diese Kriterien erfüllten, vor allem in den großen Abstandsbedingungen, sehr gering. Um eine ausreichende Anzahl von Versuchsdurchgängen für alle Bedingungen generieren zu können, wurden daher für die drei Kriterien statt eines konstanten Wertes Intervalle festgelegt, die die Bewegung jedes Zielreizes innerhalb einer Bewegungsphase erfüllen musste. Konkret mussten die Zielreize innerhalb eines Durchgangs fünf oder sechs Mal bis auf den für den betreffenden Durchgang festgelegten Abstand in die Nähe eines anderen Objektes kommen (hierbei konnte es sich um einen Zielreiz oder einen Distraktor handeln) und fünf bis sieben Mal auf die Wand treffen. Zudem musste jeder Zielreiz 15 bis 17 der 36 Unterquadranten des schwarzen Quadrates, in dem sich die Punkte bewegten, mindestens einmal durchlaufen. Wie in Experiment 1 mussten die Bewegungen der Distraktoren diese Kriterien nicht einhalten.

Die Bewegungssequenzen wurden mit derselben Software wie in Experiment 1 generiert. Es wurde ein komplettes Stimulusset erstellt, das sechs (unterschiedliche) Durchgänge jeder potentiellen Bedingung enthielt. Jeder Altersgruppe wurde dann die in 5.1.1 beschriebene Auswahl von Bedingungen aus diesem Stimulusset dargeboten.

### ***Matrix-Aufgabe***

Abweichend vom MOT-Experiment wurde für dieses Experiment eine Bildschirmauflösung von 1024x768 verwendet. Während des Experimentes trugen die Probanden Kopfhörer (Sennheiser Headmax PX20), auf denen die Töne eingespielt wurden.

Den Probanden wurde eine 5x5-Matrix aus schwarzen Linien (RGB [0 0 0], Seitenlänge 15° Schwinkel) auf weißem Untergrund (RGB [255 255 255]) gezeigt (siehe Abbildung 5.1). Der weiße Hintergrund füllte das Display komplett aus. In der Mitte des mittleren Feldes wurde durchgängig ein kleines schwarzes Kreuz (RGB [0 0 0], Seitenlänge 0.544° Schwinkel) präsentiert. In der Antwortphase wurden einzelne Felder der Matrix markiert, indem diese Felder vollständig schwarz ausgefüllt wurden.

In der Matrix befanden sich 12 Positionen, zu denen man, ausgehend vom mittleren Feld, durch drei Schritte mit den Bewegungsrichtungen oben, unten, rechts und links gelangen konnte. Aus den für jede Sequenzlänge möglichen Kombinationen von Zielpositionen und den Pfaden zu diesen Zielpositionen wurden zufällig jeweils vier Pfade bzw. Pfadkombinationen (bei mehreren Zielen) ausgewählt. Diese wurden allen Versuchspersonen dargeboten. Bei einer Sequenzlänge größer eins galt die Randbedingung, dass der markierte Endpunkt einer Dreierfolge von Bewegungen in keinem Fall Bestandteil des Pfades einer folgenden Dreierfolge sein durfte. Dieses Vorgehen wurde gewählt, um Interferenzen zwischen den Pfaden der verschiedenen zu memorierenden Orte zu vermeiden.

Während des Experimentes wurden den Probanden vier unterschiedliche (Sinus-)Töne präsentiert, die mit der Software Test Tone Generator (Esser, 2009) generiert worden waren. Dabei handelte es sich um einen Ton mit hoher Frequenz (880 Hz), einen Ton mit niedriger Frequenz (440 Hz) und zwei Töne mit mittlerer Frequenz (660 Hz), von denen der eine auf dem rechten und der andere auf dem linken Ohr zu hören war. Alle Töne wurden im deutlich überschwelligen Lautstärkebereich dargeboten. Jeder der Töne war einer Bewegungsrichtung zugeordnet. Der hohe Ton entsprach einer Bewegung ein Feld nach oben, der tiefe Ton einer Bewegung ein Feld nach unten. Der auf dem linken Ohr präsentierte Ton entsprach einer Bewegung ein Feld nach links und der auf dem rechten Ohr präsentierte Ton einer Bewegung ein Feld nach rechts.

### ***Corsi-Block-Test***

Der Corsi-Block-Test bestand aus neun schwarzen Würfeln (Seitenlänge: 2.4 cm), die in pseudozufälliger Anordnung auf einem schwarzen Brett (27.5 x 23 cm) angebracht waren. Die genaue Anordnung der Würfel auf dem Brett wurde gemäß Kessels et al. (2000) vorgenommen. Die dem Versuchsleiter zugewandten Seiten der Würfel waren mit den Zahlen

1 bis 9 beschriftet, wobei die Zahlen nur für den Versuchsleiter sichtbar waren. Die in der Aufgabe verwendeten Sequenzen entstammten ebenfalls Kessels et al. (2000).

### **Fragebogen**

In einem abschließenden Fragebogen wurden die Versuchspersonen nach persönlichen Daten, Seheinschränkungen, psychischen Störungen und Medikamenteneinnahme befragt.

### **5.1.5 Ablauf**

Die Untersuchung fand zwischen September 2009 und Mai 2010 statt. Mit den Sieben- und Neunjährigen wurde die Untersuchung in einem Raum der Martinusschule Bad Orb, mit den Elf- und Dreizehnjährigen in der Friedrich-August-Genth-Schule Wächtersbach durchgeführt. Die Erwachsenen wurden in einem Raum des Gemeindezentrums Bad Orb getestet. Während des MOT-Experiments war der jeweilige Untersuchungsraum komplett abgedunkelt und eine Lampe im Hintergrund sorgte für eine gleichbleibende, geringe Beleuchtungsstärke. Alle anderen Untersuchungsteile fanden im gleichen Raum bei normalen, künstlichen Lichtverhältnissen statt.

Die Teilnehmer nahmen einzeln an der Untersuchung teil, welche je nach Alter ca. 60 bis 75 min dauerte und in fünf Abschnitte gegliedert war. Tabelle 5.1 gibt einen Überblick über die Abfolge und die Dauer der einzelnen Abschnitte.

Tabelle 5.1: Abfolge und Dauer der einzelnen Untersuchungsabschnitte.

<b>Abschnitt</b>	<b>Dauer</b>	<b>Untersuchungsteil</b>
1	3 min	Sehtest
2	5 min	Instruktionen für das MOT-Experiment und Übung
	30-45 min	Durchführung des MOT-Experiments
3	5 min	Instruktionen für die Matrix-Aufgabe
	5 min	Matrix-Aufgabe
4	5 min	Corsi-Block-Test
5	5 min	Schriftliche Nachbefragung

Im Folgenden wird der Ablauf der einzelnen Untersuchungsteile genauer beschrieben.

***MOT-Experiment***

Im MOT-Experiment betrug der Abstand zwischen Bildschirm und Probanden 2.68 m. Die Probanden wurden zu Beginn des Experiments auf diesen Abstand gebracht und während des Experiments an die Einhaltung des Abstandes erinnert, falls sie sich bewegten.

Der zeitliche Ablauf der einzelnen Durchgänge war identisch mit dem von Experiment 1 (vgl. 4.1.5, Abbildung 4.1). Im Gegensatz zu Experiment 1 wurden in der Markierungsphase in Experiment 2 statt einem Punkt zwei oder drei Punkte markiert, die in der anschließenden Bewegungsphase gleichzeitig verfolgt werden sollten. In der Antwortphase wurde einer der Punkte markiert und die Probanden sollten angeben, ob es sich dabei um einen Zielreiz handelte. In der Hälfte der Fälle handelte es sich bei dem markierten Punkt um einen der Zielreize, in der anderen Hälfte der Fälle um einen Distraktor.

Da den verschiedenen Altersgruppen eine unterschiedliche Anzahl an Bedingungen dargeboten wurde (vgl. 5.1.1), variierte die Anzahl der Durchgänge, die die verschiedenen Altersgruppen absolvierten. Die Sieben- und Neunjährigen durchliefen 60 Durchgänge, die Elf- und Dreizehnjährigen 78 Durchgänge und die Erwachsenen 114 Durchgänge. Die Durchgänge wurden in Blöcken von acht Durchgängen und einem letzten Block mit den jeweils restlichen Durchgängen (bei Sieben- und Neunjährigen: vier; bei Elf- und Dreizehnjährigen: sechs; bei den Erwachsenen: zwei) dargeboten. Die Reihenfolge der Durchgänge war vollständig randomisiert. Zwischen den Blöcken bestand die Möglichkeit, eine Pause beliebiger Länge zu machen. Die Erwachsenen wurden dazu angehalten, während des Experiments mindestens eine längere Pause zu machen. Vor Beginn des neuen Blockes wurde die Anzahl der noch zu absolvierenden Durchgänge angegeben.

Experiment 2 war wie Experiment 1 in eine mittelalterliche Rahmengeschichte eingebettet. Statt eines einzelnen Diebes, wie in Experiment 1, hatten die Probanden hier jedoch die Aufgabe, die Mitglieder einer Diebesbande zu verfolgen. Die Instruktion fand wie in Experiment 1 vor dem Beginn des Experiments statt und auch hier war ein Training der Aufgabe in die Instruktionsphase integriert. Hierzu wurden in einem ersten Schritt vier Übungsdurchgänge in der vergrößerten Stimuluskonfiguration (vgl. 4.1.5) gezeigt, davon zwei Durchgänge mit einem Zielreiz und je ein Durchgang mit zwei oder drei Zielreizen. In vier weiteren Übungsdurchgängen wurden die Stimuli in der Größe präsentiert, in der sie auch später im Experiment zu sehen waren. Auch bei den Durchgängen in Originalgröße wurden zwei Durchgänge mit einem Zielreiz, und je ein Durchgang mit zwei oder drei Zielreizen präsentiert. Der minimale Abstand zwischen Zielreizen und Distraktoren betrug in diesen vier

Durchgängen 10.67 Winkelminuten. Alle Altersgruppen durchliefen dieselbe Instruktion und dasselbe Training.

### ***Matrix-Aufgabe***

Die Matrix-Aufgabe wurde am PC, mit einem Abstand von ca. 60 cm zwischen Proband und Bildschirm, durchgeführt. Die Probanden hatten die Aufgabe, sich ein oder mehrere Felder der Matrix zu merken, während sie sich gleichzeitig mittels einer Sequenz von Tönen durch die Matrix navigierten. Zu Beginn eines Durchgangs wurde den Probanden für 1 s die Matrix mit dem Kreuz im mittleren Feld präsentiert (Abbildung 5.1). Anschließend wurden – während die Matrix weiter sichtbar blieb – drei Töne mit einer Dauer von jeweils 500 ms und einem Interstimulusintervall von 1.25 s eingespielt. Die Probanden sollten diese Töne verwenden, um sich, beim ersten Ton vom mittleren Feld ausgehend, „gedanklich“ entsprechend der in 5.1.4 beschriebenen Tonhöhen-Richtung-Zuordnungen durch die Matrix zu bewegen. Im Zielfeld angekommen, sollten sie sich dieses Feld merken. In den Durchgängen mit einem zu merkenden Feld wurde nach einer weiteren 500 ms andauernden Darbietung der leeren Matrix eines der Felder markiert. Hierbei handelte es sich in 50 % der Fälle um das Zielfeld und in 50 % der Fälle um ein benachbartes Feld. Die Probanden sollten durch Tastendruck angeben, ob das Zielfeld oder ein anderes Feld markiert worden war. Die Ratewahrscheinlichkeit betrug somit 50 %.

In den Bedingungen mit mehr als einem zu memorierenden Ort waren die Probanden instruiert, sich das erste Zielfeld zu merken und in der nun folgenden Pause von 2 s gedanklich zum mittleren Feld zurückzukehren. Darauf folgte eine neue Sequenz aus drei Tönen, die zu einem anderen Feld führte, welches sich die Versuchspersonen zusätzlich merken sollten. Diese Abfolge wurde der zu messenden Spanne entsprechend häufig wiederholt. Im Anschluss an den letzten Ton und nach einer Pause von 500 ms wurden so viele Felder in der Matrix markiert, wie Zielfelder zu merken waren. Dabei entsprachen entweder alle präsentierten Felder den zu memorierenden Feldern (50 %), oder eines der Felder wich davon ab (50 %). In letzterem Fall wich (außer bei zwei zu memorierenden Orten) immer ein Feld ab, das nicht zuerst oder zuletzt zu merken gewesen war, und der alternativ angezeigte Ort war immer eines der benachbarten möglichen Felder.

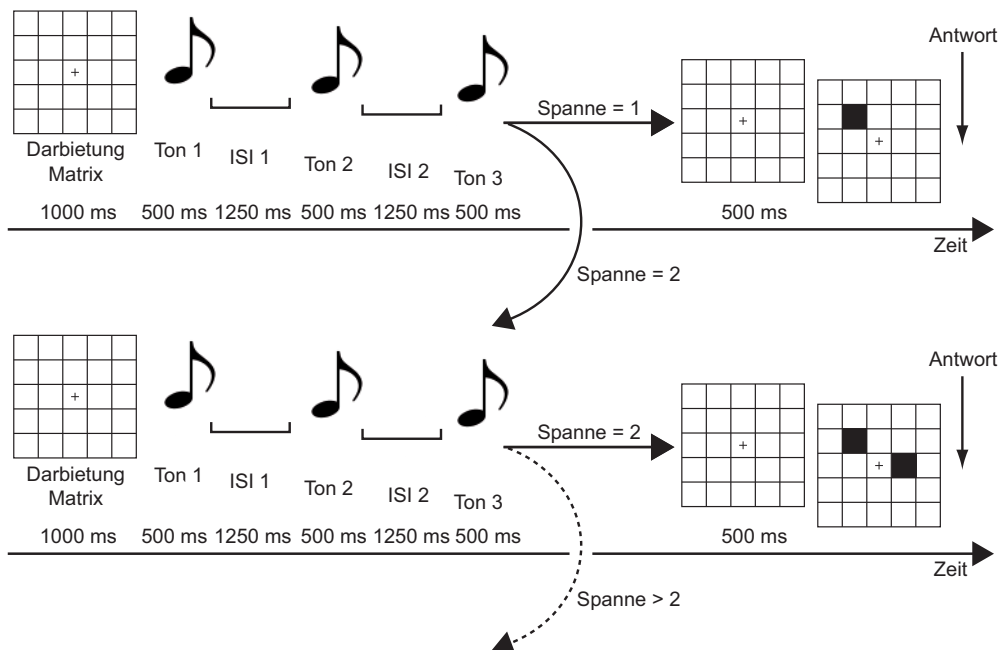


Abbildung 5.1: Ablauf eines Durchgangs in der Matrix-Aufgabe. Nach einer 1 s andauernden Präsentation der leeren Matrix wurden den Probanden (während die Matrix weiter sichtbar blieb) drei Töne (Länge je 500 ms) vorgespielt, die jeweils durch ein Interstimulusintervall (ISI) von 1.25 s getrennt waren. Diese Töne sollten die Probanden nutzen, um sich durch die Matrix zu navigieren und sich das Feld, in dem sie „angekommen“ waren (das Zielfeld) merken. War nur ein Feld zu erinnern, wurde nach einer weiteren 500 ms andauernden Darbietung der leeren Matrix ein Feld der Matrix markiert. Die Probanden sollten angeben, ob es sich bei dem markierten Feld um das Zielfeld handelte. Der Durchgang war damit beendet. War mehr als ein Feld zu erinnern, folgte dem dritten Ton eine Pause von 2 s (bei durchgehender Darbietung der leeren Matrix), in der die Probanden gedanklich zum mittleren Feld zurückkehren sollten. Dem schloss sich eine erneute Sequenz von drei Tönen an, deren Zielfeld zusätzlich zum ersten Zielfeld einzuprägen war. Diese Abfolge wiederholte sich so lange, wie Zielfelder zu merken waren.

Pro Sequenzlänge (d.h. pro Anzahl zu merkender Zielfelder) wurden vier Durchgänge absolviert und ab zwei richtigen Antworten pro Sequenzlänge wurde das Experiment fortgeführt. Vor dem Beginn einer neuen Schwierigkeitsstufe wurden die Probanden informiert, wie viele Orte nun zu merken waren. In der schwierigsten Bedingung waren fünf Orte zu memorieren. Unabhängig davon, ob die Probanden auf diesem Niveau zwei oder weniger korrekte Antworten hatten, war das Experiment danach beendet.

Dem Experiment ging eine Instruktionsphase mit integriertem Training voraus. Die Instruktionen wurden schriftlich auf dem Bildschirm dargeboten und den jüngsten Teilnehmern vorgelesen. Die Probanden wurden informiert, dass sie sich nun Muster merken sollten, die sie sich selbst im Kopf zusammenbauen sollen. Die verschiedenen Töne wurden vorgespielt (jeweils 500 ms mit 1.25 s Pause) und anschließend getestet, ob die Probanden die Töne unterscheiden und einer Richtung zuordnen konnten. Hierzu wurde die Matrix mit Kreuz dargeboten, den Probanden ein Ton vorgespielt und sie dann gefragt, in welches Feld, ausgehend vom mittleren Feld, sie der Ton geführt hatte. Insgesamt wurden acht Töne in der Reihenfolge hoch, links, tief, rechts, hoch, tief, rechts, links vorgespielt. Hatten die Probanden



mindestens sieben Mal richtig geantwortet, wurde diese Übung beendet, ansonsten begann dieselbe Übung von vorne. Im Anschluss wurden die Probanden informiert, dass nun drei Töne aufeinander folgen würden und dass sie sich gemäß der von den Tönen angegebenen Richtung in der Matrix bewegen sollten. Es wurden nun zwei Beispieldurchgänge präsentiert, in denen jeweils drei Töne präsentiert wurden (500 ms mit einem Interstimulusintervall von jeweils 1.25 s) und jeder Schritt in der Matrix von einem kleinen schwarzen Punkt (Durchmesser  $0.14^\circ$  Sehwinkel) begleitet wurde. Im ersten Beispiel wurde nach der Präsentation der Töne das Feld markiert, in dem man hätte ankommen müssen, und im zweiten Beispiel wurde ein anderes Feld schwarz eingefärbt. Anschließend wurden zwei Übungsdurchgänge präsentiert. Im ersten Durchgang wurden drei Töne mit anschließender korrekter Markierung und im zweiten Durchgang drei Töne mit anschließender abweichender Markierung dargeboten. Die Probanden sollten per Tastendruck angeben, ob sich die Markierung im Zielfeld befand oder nicht, und ihnen wurde die Richtigkeit ihrer Antwort rückgemeldet. Anschließend wurde der Fall eingeführt, dass mehrere Dreierton-Sequenzen aufeinander folgten und entsprechend mehrere Orte zu merken waren. Dieser Einführung folgte die Darbietung zweier Beispieldurchgänge mit je zwei Dreierton-Folgen. Im ersten Durchgang wurden am Ende die Zielfelder markiert, im zweiten Durchgang wich eines der beiden Felder von den Zielfeldern ab. Es folgten zwei Übungsdurchgänge, in denen jeweils zwei Dreierton-Sequenzen präsentiert wurden und von denen ein Durchgang die Zielfelder anzeigte und ein Durchgang ein alternatives Feld anzeigte. Die Probanden antworteten mit Tastendruck und bekamen Feedback für die Richtigkeit ihrer Antwort.

### ***Corsi-Block-Test***

Für den Corsi-Block-Test saßen sich Proband und Versuchsleiter an einem Tisch gegenüber, auf dem das Corsi-Brett stand. Zu Beginn erklärte der Versuchsleiter die Aufgabe, die darin bestand, eine bestimmte Sequenz von Blöcken in der gleichen Reihenfolge anzutippen, wie es der Versuchsleiter vorgemacht hatte. Zur Überprüfung des Verständnisses wurde eine Sequenz aus zwei Blöcken demonstriert, die der Proband nachmachen sollte.

Die Blöcke wurden vom Versuchsleiter mit dem Finger mit einer Frequenz von 1 Block/s angetippt. Die Probanden tippten die Blöcke ebenfalls mit den Fingern an. Dabei sollten sie immer nur einen Finger benutzen. Die Probanden durften erst beginnen, wenn der Versuchsleiter die Vorführung der Sequenz komplett beendet hatte.

Es wurden jeweils zwei Sequenzen einer Länge dargeboten. Wurde mindestens eine der Sequenzen korrekt reproduziert, wurde zur nächsten Länge übergegangen. Wurden beide Sequenzen falsch reproduziert, wurde der Test beendet. Selbstberichtigungen des Probanden

waren erlaubt. Die Kinder begannen mit Sequenzen der Länge 2 und Erwachsene mit Sequenzen der Länge 4.

## 5.2 Ergebnisse

Im Folgenden werden die Ergebnisse der Datenanalyse, zuerst für das MOT-Experiment (5.2.1) und im Anschluss für die Aufgaben zur visuell-räumlichen Verarbeitungskapazität (5.2.2), vorgestellt. Abschließend werden die Ergebnisse der Korrelationsberechnungen berichtet (5.2.3).

### 5.2.1 MOT-Experiment

In diesem Abschnitt werden zunächst die Ergebnisse der deskriptiven Auswertung des MOT-Experimentes und anschließend die Ergebnisse der inferenzstatistischen Auswertung erläutert.

Abbildung 5.2 zeigt die mittlere Trefferrate der einzelnen Altersgruppen über die verschiedenen Abstandsbedingungen bei zwei Zielreizen. Hier zeigt sich, dass alle Altersgruppen in den jeweiligen schwersten Abstandsbedingungen eine Leistung auf Zufallsniveau zeigen, welche sich mit zunehmendem Abstand verbessert. Hierbei erreicht die Leistung der Siebenjährigen in der leichtesten getesteten Bedingung einen Wert von ca. 70 %. Die Neun- bis Dreizehnjährigen zeigen eine untereinander ähnliche, immer deutlich über den Siebenjährigen liegende Leistung, wobei die Dreizehnjährigen jedoch, im Gegensatz zu den anderen beiden Altersgruppen, in den leichtesten Bedingungen optimale Leistung erreichen. Die Erwachsenen liegen in allen außer den leichtesten Abstandsbedingungen über der Leistung der Kindergruppen.

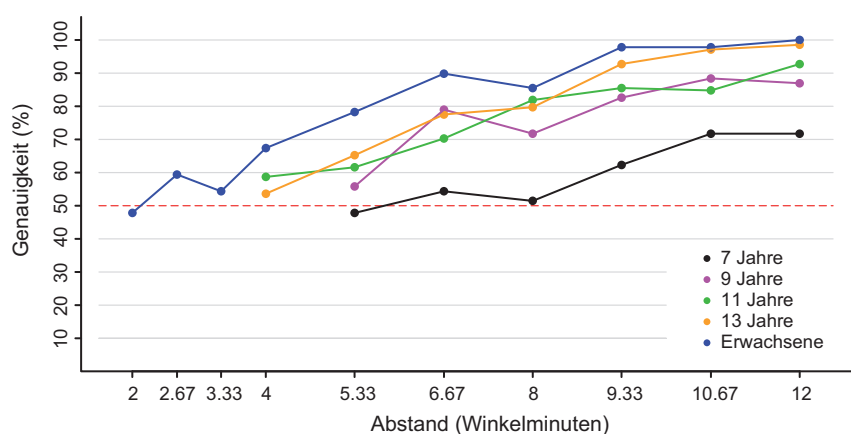


Abbildung 5.2: Mittlere Genauigkeit der Altersgruppen in Abhängigkeit vom Zielreiz-Distraktor-Abstand in der MOT-Aufgabe mit zwei Zielreizen. Die Ratewahrscheinlichkeit (rote gestrichelte Linie) lag bei 50 %.

Die mit lokaler linearer Regression ermittelten absoluten Schwellenwerte der einzelnen Altersgruppen für zwei Zielreize und die mittels Bootstrapping ermittelten

Konfidenzintervalle ( $\alpha$ -Niveau von 5 % Bonferroni-korrigiert für 10 Vergleiche: 0.5 %) sind in Abbildung 5.3 dargestellt (für genaue Werte siehe Anhang B, Tabelle B-1). Die Abbildung zeigt einen Abfall der Schwellenwerte mit zunehmendem Alter, wobei die Siebenjährigen deutlich von den anderen Altersgruppen abweichen. Der weitere Entwicklungsverlauf zwischen 9 Jahren und dem Erwachsenenalter verläuft linear. Dabei unterscheiden sich die Neun- bis Dreizehnjährigen jedoch nicht signifikant voneinander. Im Gegensatz dazu liegt der Schwellenwert der Erwachsenen unter allen Kindergruppen.

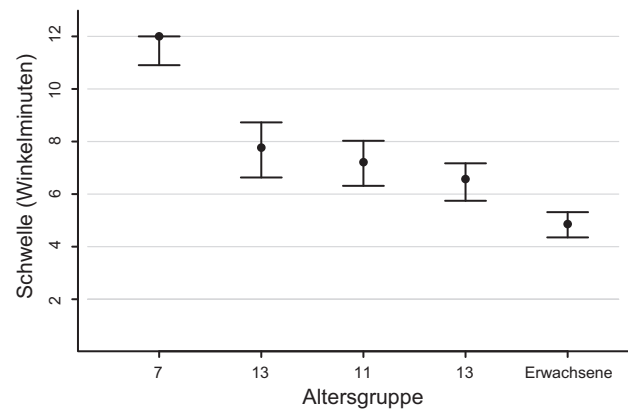


Abbildung 5.3: Mit lokaler linearer Regression ermittelte absolute Schwellen der einzelnen Altersgruppen in der MOT-Aufgabe mit zwei Zielreizen und Bootstrap-Konfidenzintervalle mit einer (Bonferroni-korrigierten) Überdeckungswahrscheinlichkeit von 99.95 %.

Abbildung 5.4 zeigt die mittlere Trefferrate der einzelnen Altersgruppen über die verschiedenen Abstandsbedingungen bei drei Zielreizen. Die prinzipielle Charakterisierung der Verläufe ähnelt der mit zwei Zielreizen. Insgesamt sind die Leistungen jedoch niedriger. Auch unterscheidet sich die Leistung der drei älteren Kinderstichproben insofern, als die Leistung der Neunjährigen, außer in der leichtesten Bedingung, unter der der anderen beiden Kindergruppen liegt. Die Antwortgenauigkeit der Siebenjährigen steigt über die untersuchten Abstandsbedingungen hinweg kaum an.

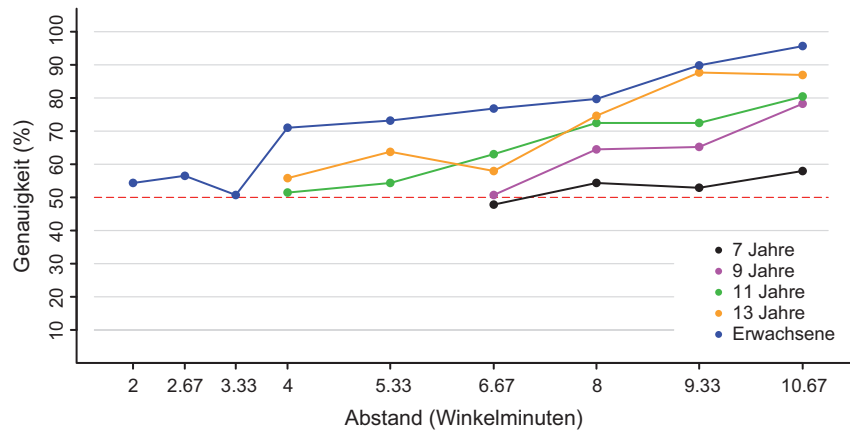


Abbildung 5.4: Mittlere Genauigkeit der Altersgruppen in Abhängigkeit vom Zielreiz-Distraktor-Abstand in der MOT-Aufgabe mit drei Zielreizen. Die Ratewahrscheinlichkeit (rote gestrichelte Linie) lag bei 50 %.

Die mittels lokaler linearer Regression ermittelten Schwellenwerte und Konfidenzintervalle ( $\alpha$ -Niveau von 5 % Bonferroni-korrigiert für 10 Vergleiche: 0.5 %) der Altersgruppen bei drei Zielreizen zeigt Abbildung 5.5 (für genaue Werte siehe Anhang B, Tabelle B-2). Wieder sinkt die Schwelle mit zunehmendem Alter. Das breite Konfidenzintervall für die Siebenjährigen legt nahe, dass das Intervall für diese Altersgruppe nicht sinnvoll schätzbar war. Der Abfall zwischen 9 Jahren und dem Erwachsenenalter verläuft wie bei zwei Zielreizen linear. Dabei sind die Unterschiede zwischen den Kinder-Stichproben jedoch stärker ausgeprägt als bei zwei Zielreizen. Auch wenn sich die benachbarten Altersgruppen nicht bedeutsam unterscheiden, so ist der Unterschied zwischen den Neun- und Dreizehnjährigen doch signifikant. Die Erwachsenen unterscheiden sich von allen Kindergruppen außer den Dreizehnjährigen.

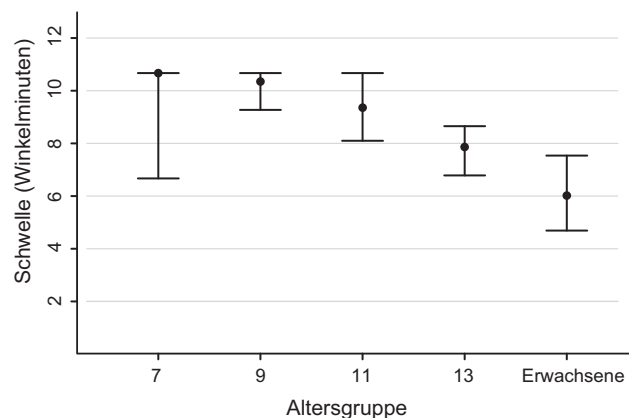


Abbildung 5.5: Mit lokaler linearer Regression ermittelte absolute Schwellen der einzelnen Altersgruppen in der MOT-Aufgabe mit drei Zielreizen und Bootstrap-Konfidenzintervalle mit einer (Bonferroni-korrigierten) Überdeckungswahrscheinlichkeit von 99.95 %.

Abbildung 5.6 zeigt zusammenfassend die mittels lokaler linearer Regression ermittelten absoluten Schwellen der verschiedenen Altersstufen für zwei bzw. drei Zielreize mit (Bonferroni-korrigierten) 99.95 %-Konfidenzintervallen. Diese Abbildung vermittelt einen ersten Eindruck davon, dass die Schwellenwerte der verschiedenen Altersgruppen von zwei zu drei Zielreizen ansteigen.

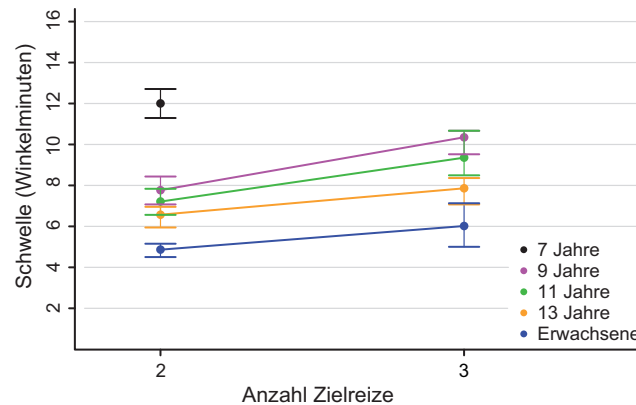


Abbildung 5.6: Die mit lokaler linearer Regression ermittelten absoluten Schwellen der Altersgruppen bei zwei und drei Zielreizen und Bootstrap-Konfidenzintervalle mit einer (Bonferroni-korrigierten) Überdeckungswahrscheinlichkeit von 99.95 %.

Wie in 5.1.1 dargestellt, wurde für jede Person und Zielreizanzahl zusätzlich eine *individuelle* Schwelle bestimmt. Abbildung 5.7 gibt die mittleren individuellen Schwellenwerte der verschiedenen Altersgruppen für zwei und drei Zielreize wieder (für genaue Werte siehe Anhang B, Tabellen B-3 und B-4). Ein Vergleich mit Abbildung 5.6 zeigt die Ähnlichkeit der mit beiden Methoden ermittelten Schwellenwerte. Die auf individuellen Werten basierenden Schwellen liegen zwar insgesamt auf höherem Niveau als die mit lokaler linearer Regression ermittelten Schwellen, die Reihenfolge der Altersgruppen bleibt jedoch ebenso erhalten wie der Anstieg der Schwellenwerte von zwei zu drei Zielreizen.

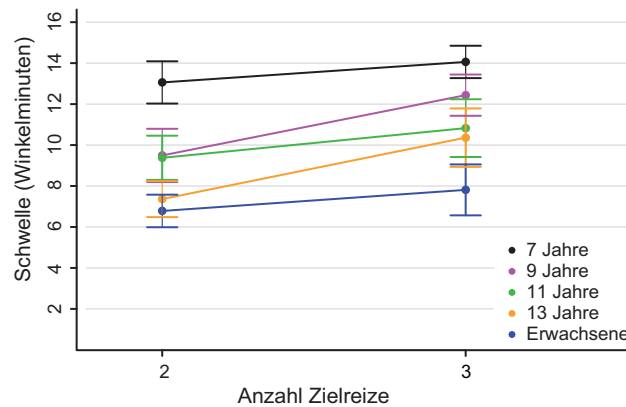


Abbildung 5.7: Mittlere individuelle Schwellenwerte der verschiedenen Altersgruppen bei zwei und drei Zielreizen und Konfidenzintervalle mit einer (Bonferroni-korrigierten) Überdeckungswahrscheinlichkeit von 99.95 %.

Die bisherigen deskriptiven Ergebnisse deuten darauf hin, dass die Siebenjährigen nicht in der Lage waren, zwei bzw. drei Zielreize zuverlässig zu verfolgen. Diese Vermutung basiert auf zwei Anhaltspunkten. Erstens blieb diese Altersgruppe in allen Abstandsbedingungen und sowohl bei zwei als auch bei drei Zielreizen unter einer Antwortgenauigkeit von entweder 75 oder 83 %, also den Werten, die hier in der Auswertung als Schwellenwerte verwendet wurden. Zweitens, und damit in Verbindung stehend, liegen die errechneten Schwellenwerte dieser Altersgruppe teilweise außerhalb des gemessenen Abstandsbereiches. Die Siebenjährigen wurden daher aus der weiteren inferenzstatistischen Analyse ausgeschlossen.

Die auf den individuellen Schwellenwerten basierende zweifaktorielle ANOVA mit Messwiederholung mit dem Zwischensubjektfaktor Altersgruppe (9, 11, 13 Jahre vs. Erwachsene) und dem Messwiederholungsfaktor Anzahl Zielreize (2 vs. 3) zeigte einen signifikanten Effekt des Faktors Altersgruppe ( $F(3, 88) = 11.93, p < .0001, \eta^2 = .29$ ) und des Faktors Anzahl Zielreize ( $F(1, 88) = 43.27, p < .0001, \eta^2 = .33$ ). Ebenso deutete eine marginal signifikante Interaktion zwischen Altersgruppe und Anzahl Zielreize ( $F(3, 88) = 2.51, p = .064, \eta^2 = .08$ ) auf eine uneinheitliche Wirkung der Faktoren hin. Post-hoc-Vergleiche hinsichtlich des Faktors Altersgruppe zeigten, dass sich die Neunjährigen signifikant von den Dreizehnjährigen ( $p < .05$ ) und den Erwachsenen ( $p < .0001$ ) unterschieden. Ebenso unterschieden sich die Elfjährigen von den Erwachsenen ( $p < .0001$ ).

Die tendenziell signifikante Interaktion zwischen den Faktoren Altersgruppe und Anzahl Zielreize deutet auf eine uneinheitliche Veränderung des Schwellenwertes von zwei zu drei Zielreizen bei den verschiedenen Altersgruppen hin. Um diese Interaktion genauer zu analysieren, wurden die Differenzen der Schwellenwerte für zwei und drei Zielreize bei allen

Altersgruppen näher betrachtet. Abbildung 5.8 zeigt die Differenzwerte in den Altersgruppen 9, 11, 13 Jahre und Erwachsene (für genaue Werte siehe Anhang B, Tabelle B-5).

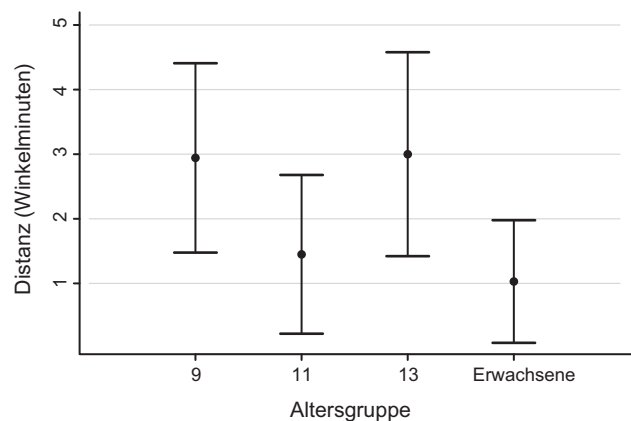


Abbildung 5.8: Auf den individuellen Schwellenwerten für zwei und drei Zielreizen basierende mittlere Differenzwerte für die vier älteren Altersgruppen und Konfidenzintervalle mit einer Überdeckungswahrscheinlichkeit von 95 % (unkorrigiert).

Post-hoc  $t$ -Tests für abhängige Stichproben (einseitig,  $\alpha$ -Niveau von 5 % Bonferroni-korrigiert für 4 Vergleiche: 1.25 %) zeigten, dass sich die Schwellenwerte für zwei vs. drei Zielreize bei den Neun-, Elf- und Dreizehnjährigen signifikant voneinander unterscheiden (Neunjährige:  $t(22) = -4.16$ ,  $p < .0001$ ,  $r_{\text{äquivalent}} = .66$ ; Elfjährige:  $t(22) = -2.45$ ,  $p < .0125$ ,  $r_{\text{äquivalent}} = .46$ ; Dreizehnjährige:  $t(22) = -3.94$ ,  $p < .0125$ ,  $r_{\text{äquivalent}} = .64$ ). Bei den Erwachsenen ( $t(22) = -2.25$ ,  $p = .0175$ ,  $r_{\text{äquivalent}} = .43$ ) unterschieden sich die Schwellenwerte bei zwei und drei Zielreizen tendenziell voneinander.

Zur Überprüfung der statistischen Hypothese H3 wurde mit einer Kontrastanalyse getestet, ob der in 5.1.2 vorhergesagte Verlauf der Schwellenwert-Differenzen mit den empirischen Werten übereinstimmt. Der entsprechende  $t$ -Wert erwies sich als signifikant ( $t(88) = 2.50$ ,  $p < .01$ ,  $r_{\text{effect size}} = .22$ ). Die statistische Hypothese H3 kann somit als bestätigt betrachtet werden.

Die post-hoc  $t$ -Tests für unabhängige Stichproben ( $\alpha$ -Niveau von 5 % Bonferroni-korrigiert für 3 Vergleiche: 1.67 %), mit denen untersucht werden sollte, ob sich die jeweils benachbarten Altersgruppen in ihren Schwellenwert-Differenzen unterschieden, ergaben marginale Unterschiede zwischen Neun- und Elfjährigen ( $t(88) = 1.65$ ,  $p = .052$ ,  $r_{\text{äquivalent}} = .17$ ) und Elf- und Dreizehnjährigen ( $t(88) = -1.71$ ,  $p = .045$ ,  $r_{\text{äquivalent}} = .18$ ). Der Unterschied zwischen Dreizehnjährigen und Erwachsenen war signifikant ( $t(88) = 2.18$ ,  $p < .0167$ ,  $r_{\text{äquivalent}} = .23$ ).

### 5.2.2 Aufgaben zur Verarbeitungskapazität

#### *Matrix-Aufgabe*

Abbildung 5.9 gibt den mittleren Matrix-Gesamtscore der verschiedenen Altersgruppen wieder (für genaue Werte siehe Anhang B, Tabelle B-6). In einer einfaktoriellen ANOVA mit dem Zwischensubjektfaktor Altersgruppe (9, 11, 13 Jahre vs. Erwachsene) zeigte sich ein signifikanter Effekt der Altersgruppe ( $F(3, 88) = 7.26, p < .0001, \eta^2 = .20$ ). Post-hoc-Vergleiche ergaben, dass die Neunjährigen ( $p < .0001$ ), die Elfjährigen ( $p < .005$ ) und die Dreizehnjährigen ( $p < .05$ ) in ihren Werten signifikant unter denen der Erwachsenen lagen. Alle anderen Vergleiche waren nicht statistisch bedeutsam.

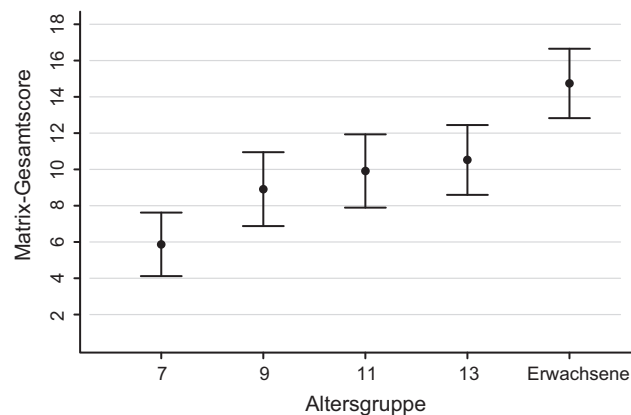


Abbildung 5.9: Mittlerer Matrix-Gesamtscore der verschiedenen Altersgruppen und 95 %-Konfidenzintervalle (unkorrigiert).

#### *Corsi-Block-Test*

Abbildung 5.9 gibt die Mittelwerte der einzelnen Altersgruppen im Corsi-Gesamtscore wieder (wie auch bei der Matrix-Aufgabe werden die deskriptiven Daten der Siebenjährigen der Vollständigkeit halber mit berichtet; für genaue Werte siehe Anhang B, Tabelle B-7). Auch hier zeigte sich in einer einfaktoriellen ANOVA mit dem Zwischensubjektfaktor Altersgruppe (9, 11, 13 Jahre vs. Erwachsene) ein signifikanter Effekt der Altersgruppe ( $F(3, 88) = 4.57, p < .01, \eta^2 = .14$ ). Post-hoc-Vergleiche ergaben, dass die Leistung der Neunjährigen signifikant unter der Leistung der Erwachsenen lag ( $p < .005$ ). Die übrigen Vergleiche zwischen den Altersgruppen waren nicht statistisch bedeutsam.



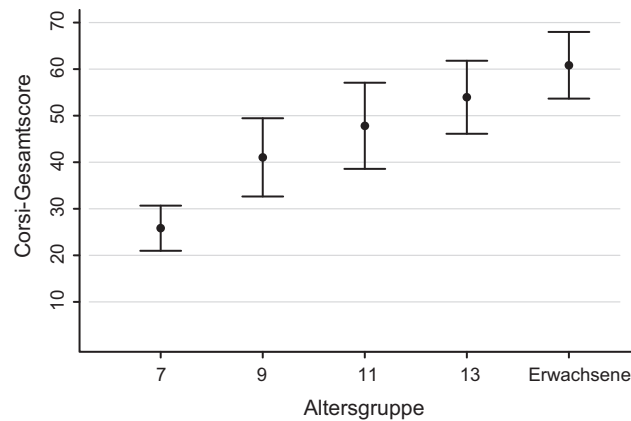


Abbildung 5.9: Mittlerer Corsi-Gesamtscore der verschiedenen Altersgruppen und 95 %-Konfidenzintervalle (unkorrigiert).

### 5.2.3 Korrelationen zwischen den Schwellenwerten und den Maßen des Arbeits- und Kurzzeitgedächtnisses

Die Korrelation zwischen der Schwellenwert-Differenz und dem Matrix-Gesamtscore des Arbeitsgedächtnistests betrug  $r = -.16$  ( $p = .065$ ) und war somit marginal signifikant. Die statistische Hypothese H4 kann somit unter Vorbehalt angenommen werden. Bei Auspartialisierung des Faktors Altersgruppe beträgt die Korrelation zwischen Schwellenwert-Differenz und Arbeitsgedächtnisleistung noch  $r = -.11$  ( $p(\text{einseitig}) = .131$ ).

Die Korrelation zwischen der Schwellenwert-Differenz und dem Gesamtscore des Corsi-Block-Tests betrug  $r = -.19$  ( $p < .05$ ). Die statistische Hypothese H5 kann somit als bestätigt betrachtet werden. Partialisiert man den Faktor Altersgruppe aus der Korrelation aus, beträgt die Korrelation  $r = -.15$  ( $p(\text{einseitig}) = .077$ ).

## 5.3 Diskussion

Mit Experiment 2 sollte untersucht werden, ob die Entwicklung der Auflösung der Aufmerksamkeit auf entwicklungsbedingte Unterschiede in der Verarbeitungskapazität zurückgeführt werden kann. Hierzu wurde den Probanden eine MOT-Aufgabe vorgegeben, in der sowohl der Abstand zwischen Zielreiz und Distraktoren als auch die Anzahl der Zielreize variiert wurden. Die auf der Grundlage dieses Versuchsaufbaus ermittelten kritischen Abstände der einzelnen Altersgruppen nahmen sowohl bei zwei als auch bei drei Zielreizen mit zunehmendem Alter ab. Dieses Ergebnismuster bestätigt den in Experiment 1 beobachteten Verlauf eines abnehmenden kritischen Abstandes mit zunehmendem Alter und zeigt, dass dieser auch bei mehreren Objekten zutrifft.

Neben diesem grundlegenden Ergebnis weist die vorliegende Untersuchung drei Hauptergebnisse auf. Erstens stiegen die Schwellenwerte über die Altersgruppen hinweg mit

zunehmender Zielreizanzahl an. Zweitens war der Anstieg des kritischen Abstandes von zwei zu drei Zielreizen in den verschiedenen Altersgruppen vergleichbar mit der Höhe der Schwellenwerte, die in Experiment 1 als kritische Abstände für die verschiedenen Altersgruppen ermittelt worden waren. Drittens zeigte sich ein tendenziell signifikanter Zusammenhang zwischen der individuellen Veränderung des kritischen Abstandes von zwei zu drei Zielreizen und der individuellen Arbeitsgedächtnisleistung sowie ein signifikanter Zusammenhang zwischen der individuellen Veränderung des kritischen Abstandes von zwei zu drei Zielreizen und der Kurzzeitgedächtnisleistung. Diese Ergebnisse werden im Folgenden diskutiert.

### **5.3.1 Anstieg des kritischen Abstandes mit zunehmender Zielreizanzahl**

Der signifikante Haupteffekt des Faktors Anzahl Zielreize zeigt, dass die individuellen Schwellenwerte der Probanden über alle Altersstufen hinweg von zwei zu drei Zielreizen anstiegen. Post-hoc-Tests, die für alle Altersgruppen den Schwellenwert bei zwei und drei Zielreizen vergleichen, zeigen, dass dieses Ergebnis für alle Altersgruppen zumindest tendenziell zutrifft.

Der hier vorgenommenen Manipulation der Zielreizanzahl lag die Absicht zugrunde, die pro Zielreiz zur Verfügung stehenden Ressourcen zu variieren, um damit einhergehende Effekte auf die Größe der Selektionsregion untersuchen zu können. Die im Object-Tracking-Experiment in allen Altersgruppen beobachtete Erhöhung des kritischen Abstandes mit zunehmender Anzahl der zu verfolgenden Zielreize deutet nun darauf hin, dass die Abnahme der pro Objekt zur Verfügung stehenden Ressourcen nur noch ein verringertes Zusammenziehen des Fokus der Aufmerksamkeit um die Zielreize zulässt. Dieser Effekt lässt erstens darauf schließen, dass das Zusammenziehen des Fokus Ressourcen benötigt, und zweitens, dass die Ressourcen für sowohl das Verfolgen von Objekten als auch für das Zusammenziehen des Fokus demselben Ressourcenpool entnommen sind.

Dieser Befund ist konsistent mit früheren Untersuchungen, die mit anderen Versuchsanordnungen zeigen, dass sowohl das Verfolgen einer steigenden Anzahl von Objekten als auch ein Anstieg in der Präzision der Selektion zunehmend Verarbeitungsressourcen bindet und dass die Ressourcen für beide Aspekte demselben Ressourcenpool entstammen (Alvarez & Franconeri, 2007; Bettencourt & Somers, 2009; Howard & Holcombe, 2008; Iordanescu et al., 2009; Tombu & Seiffert, 2008, 2010). Wie diese Studien widerlegt die vorliegende Arbeit somit den Vorschlag von Cavanagh (2004), der postuliert, dass die Kapazitätsgrenze der Aufmerksamkeit (d.h. die Anzahl der Objekte, die verfolgt werden können) unabhängig von der Auflösung der Aufmerksamkeit (also der

unteren räumlichen Grenze der Selektion) sei. Dieser Vorschlag Cavanaghs basiert auf der Untersuchung von Intriligator und Cavanagh (2001), in der sich gezeigt hatte, dass die Auflösung der Aufmerksamkeit unabhängig davon ist, wie viele Objekte zu verfolgen sind. Die vorliegende Studie, die in der Lage ist, das räumliche Ausmaß der Selektionsregion genau zu erfassen, zeigt deutlich, die Auflösung der Aufmerksamkeit doch von der Anzahl der zu verfolgenden Objekte abhängt und dass die beiden Grenzen der Selektion somit zusammenhängen. Das Ergebnis der Untersuchung von Intriligator und Cavanagh (2001) ist möglicherweise auf methodische Ungenauigkeiten dieser Studie, wie z.B. die Konfundierung von Abstand, Größen und Geschwindigkeit oder die nachträgliche Schätzung der minimalen Abstände durch Simulationen, zurückzuführen und kann bei einer genaueren Kontrolle der Untersuchungsbedingungen nicht aufrechterhalten werden.

Die vorliegenden Ergebnisse sind somit konsistent mit der Theorie flexibler Aufmerksamkeitsressourcen (Alvarez & Franconeri, 2007; vgl. 2.3), in der angenommen wird, dass beim Verfolgen von Objekten begrenzte Verarbeitungsressourcen verbraucht werden, die flexibel, je nach Aufgabenanforderung, für mehr Objekte, höhere Geschwindigkeit oder größere Nähe der Objekte verwendet werden können. Auch in der vorliegenden Studie scheinen die zur Verfügung stehenden Ressourcen flexibel zwischen der jeweiligen Anzahl der Objekte und der Anforderung, den Aufmerksamkeitsfokus zu verkleinern, verteilt zu werden.

Im Kontext der MOT-Forschung wurden zwei weitere Theorien entwickelt, um die Kapazitätsbegrenzung der Aufmerksamkeit beim Verfolgen mehrerer Objekte zu erklären. Diese könnten prinzipiell zumindest einen Teil des hier beobachteten Effektes erklären. Bei der ersten Theorie handelt es sich um die *Theorie fixer Ressourcen* (z.B. Alvarez & Franconeri, 2007; Howard & Holcombe, 2008), die im Prinzip der FINST-Theorie von Pylyshyn (1989) entspricht (vgl. Fußnote 11). In dieser wird angenommen, dass Aufmerksamkeit in Form diskreter Aufmerksamkeitszeiger vorliegt, die in ihrer Anzahl auf typischerweise vier Stück begrenzt sind. Wenn, wie in der vorliegenden Studie, die Zahl der möglichen Zeiger mit zwei oder drei Objekten nicht ausgeschöpft wird (bzw. bei Kindern zumindest nicht überschritten wird), sollte eine zunehmende Nähe zwischen den Objekten gemäß der Theorie fixer Ressourcen keinen unterschiedlichen Effekt hervorrufen. Dies ist jedoch in den vorliegenden Daten der Fall. Dieses Ergebnis deutet darauf hin, dass die Annahmen der Theorie fixer Ressourcen entweder nicht haltbar sind oder die Theorie zumindest um weitere Annahmen erweitert werden müsste, um die Ergebnisse der vorliegenden Untersuchung abzubilden.

Die zweite Theorie ist die *Räumliche-Interferenz-Theorie* (Franconeri, Jonathan & Scimeca, 2010; Franconeri, Lin, Pylyshyn, Fisher & Enns, 2008; Shim et al., 2008). Unter diesem Namen werden eine Reihe von Hypothesen zusammengefasst, die besagen, dass der Leistungsabfall in der MOT-Aufgabe mit zunehmender Anzahl von Objekten oder zunehmender Geschwindigkeit nicht auf einer Begrenzung von Aufmerksamkeitsressourcen oder Aufmerksamkeitszeigern beruht, sondern in räumlichen Faktoren begründet liegt. So wird davon ausgegangen, dass jede Selektionsregion mit einem hemmenden Rand umgeben ist (z.B. Cutzu & Tsotsos, 2003; N. G. Müller, Mollenhauer, Rösler & Kleinschmidt, 2005; Steinman, Steinman & Lehmkuhle, 1995; vgl. 7.4) und dass es zu Interferenzen kommt, wenn sich ein Zielreiz in den hemmenden Rand eines anderen Zielreizes hineinbewegt. Es wird nun im Rahmen der Räumlichen-Interferenz-Theorie argumentiert, dass ein Anstieg der Zielreizanzahl dazu führe, dass die Abstände zwischen den Zielreizen (im Durchschnitt) abnehmen und somit die Wahrscheinlichkeit steige, dass ein Zielreiz in den hemmenden Rand eines anderen Zielreizes gelange (Shim et al., 2008). Ebenso führe eine Zunahme der Geschwindigkeit zu häufigerem Aufeinandertreffen der Zielreize pro Zeiteinheit. Es komme folglich häufiger zu räumlicher Interferenz und damit einer erhöhten Wahrscheinlichkeit, dass ein Zielreiz verloren gehe. Diese beiden Teilhypothesen der Räumlichen-Interferenz-Theorie können mit dem vorliegenden Versuchsaufbau nicht klar widerlegt werden. Die Anzahl der Aufeinandertreffen der Zielreize wurde in der vorliegenden Untersuchung nicht kontrolliert, d.h. es wurde nicht kontrolliert, ob es sich bei der festgelegten Anzahl der Aufeinandertreffen eines Zielreizes mit einem anderen Objekt bei dem anderen Objekt um einen Zielreiz oder einen Distraktor handelte. Bei drei Zielreizen (bei gleichbleibender Fläche, in der sich die Objekte bewegen) bestand im vorliegenden Versuchsaufbau tatsächlich eine höhere Wahrscheinlichkeit, dass Zielreize aufeinandertreffen, als dies bei zwei Zielreizen der Fall war. Eine weitere Teilhypothese der Räumlichen-Interferenz-Theorie kann jedoch widerlegt werden. Franconeri und Kollegen argumentieren, dass es durch die Zunahme der Geschwindigkeit, mit der sich die Objekte bewegen, zu mehr Aufeinandertreffen von Zielreizen und Distraktoren komme. Damit gehe ein erhöhtes Verwechslungsrisiko von Zielreizen und Distraktoren einher und die Performanz sinke. Die Ergebnisse der vorliegenden Untersuchung können diesen Wirkmechanismus klar widerlegen. In der vorliegenden Studie wird die Anzahl der Aufeinandertreffen von Zielreiz und Distraktoren über beide Zielreizanzahlen hinweg konstant gehalten und trotzdem unterscheiden sich die Leistungen bei zwei und drei Zielreizen. Das *häufigere* Aufeinandertreffen von Zielreiz und Distraktoren spielt somit nicht die maßgebliche Rolle für die geringere Leistung bei mehr

Zielreizen, vielmehr scheint die Anzahl der Zielreize an sich der relevante Faktor zu sein. Dieses Ergebnis deutet darauf hin, dass die entsprechende Teilhypothese der Räumlichen-Interferenz-Theorie nicht beibehalten werden kann und die Theorie dementsprechend angepasst werden muss.

### **5.3.2 Bezug zu Studien zum visuell-räumlichen Arbeitsgedächtnis**

Über die Forschung zur visuell-räumlichen Aufmerksamkeit hinausgehend steht die vorliegende Studie auch im Einklang mit Befunden aus der Forschung zum visuell-räumlichen Arbeitsgedächtnis, in denen beobachtet wurde, dass unter hoher Arbeitsgedächtnisauslastung (Caparos & Linnell, 2010; Linnell & Caparos, 2011) und bei Personen mit geringer Arbeitsgedächtniskapazität (Heitz & Engle, 2007; Poole & Kane, 2009) bzw. beidem (Ahmed & de Fockert, 2012) die Fähigkeit zum Zusammenziehen des Fokus der visuell-räumlichen Aufmerksamkeit herabgesetzt ist. Die Tatsache, dass die Verfügbarkeit sowohl von Arbeitsgedächtnis- als auch von Aufmerksamkeitsressourcen das räumliche Profil der Selektion beeinflusst, liefert einen weiteren Hinweis auf den engen Zusammenhang von Aufmerksamkeit und Arbeitsgedächtnis (Awh, Vogel, et al., 2006; Chun, 2011; Gazzaley & Nobre, 2012; vgl. 2.1.2). Hierfür sprechen auch die Korrelationen der individuellen Arbeitsgedächtnis- und der Kurzzeitgedächtniskapazität mit der individuellen Schwellenwert-Differenz in der vorliegenden Arbeit. Dies deutet darauf hin, dass es sich bei den Gedächtnismaßen und der Aufmerksamkeitskapazität um ähnliche Konstrukte handelt, die alle die Begrenzung eines zentralen Faktors – der Verarbeitungskapazität – widerspiegeln.

Aus früheren Untersuchungen ist bekannt, dass Maße des Kurzzeitgedächtnisses stärker strategische Aspekte wie Wiederholung oder Gruppierung des zu erinnernden Materials widerspiegeln (z.B. Cowan et al., 2005) als dies bei Arbeitsgedächtnismaßen der Fall ist. Der Befund, dass die Kurzzeitgedächtnismaße in der vorliegenden Studie etwas höher mit der Schwellenwert-Differenz korrelieren als das Arbeitsgedächtnis, könnte darauf hindeuten, dass auch strategische Komponenten in der MOT-Aufgabe eine Rolle spielten. Tatsächlich hat sich in einer frühen Studie von Yantis (1992) gezeigt, dass perzeptuelles Gruppieren in der MOT-Aufgabe eine Rolle spielt und die dort beobachteten Leistungen beeinflussen kann. Somit könnte dieser Faktor auch die Leistung in der vorliegenden MOT-Aufgabe beeinflusst und so die höhere Korrelation zwischen Differenzwert und Kurzzeitgedächtniskapazität verursacht haben. Die ebenfalls vorhandene Korrelation zwischen den Leistungen in der Arbeitsgedächtnisaufgabe und den Schwellenwert-Differenzen deutet jedoch darauf hin, dass auch die „reine“ Verarbeitungskapazität eine Rolle spielt.

Aus der Gruppe der verwandten Arbeitsgedächtnisstudien sind die Untersuchungen von Heitz und Engle (2007) und Poole und Kane (2009) besonders interessant, da sie die bisher vor allem auf räumliche Aspekte der Selektion beschränkten Überlegungen um eine zeitliche Perspektive erweitern. Diese Studien beobachteten den Zeitverlauf des Zusammenziehens des Fokus der Aufmerksamkeit bei Probanden mit hoher und niedriger Arbeitsgedächtniskapazität und fanden, dass Probanden mit niedriger Kapazität den Fokus der Aufmerksamkeit langsamer zusammenziehen (Heitz & Engle, 2007) bzw. weniger lang im zusammengezogenen Zustand halten können (Poole & Kane, 2009). Sie konkretisieren somit den Zusammenhang zwischen zur Verfügung stehenden Verarbeitungsressourcen und Größe des Aufmerksamkeitsfokus und schlagen einen Mechanismus vor, der möglicherweise auch den vorliegenden Daten zugrunde liegen könnte. So wäre es auch im hier verwendeten Versuchsaufbau denkbar, dass mit der Zunahme der Zielreizanzahl und der damit einhergehenden Verringerung der Ressourcen pro Zielreiz das Zusammenziehen des Fokus verlangsamt wurde oder der Aufmerksamkeitsfokus weniger lange im zusammengezogenen Zustand gehalten werden konnte. Dies könnte dazu geführt haben, dass die Distraktoren bei Versuchspersonen mit geringerer Verarbeitungskapazität zu Beginn der Trackingphase länger Gelegenheit hatten, in die Selektionsregion zu gelangen und verwechselt zu werden. Der hier verwendete Versuchsaufbau erlaubt es nicht, die Daten im zeitlichen Verlauf zu analysieren, zukünftige Studien sollten dies jedoch ins Auge fassen, um zu klären, ob der von Heitz und Engle bzw. Poole und Kane beschriebene Mechanismus der verringerten Auflösung der Aufmerksamkeit mit zunehmender Zielreizanzahl zugrunde liegt.

### **5.3.3 Entwicklung des Arbeits- und Kurzzeitgedächtnisses**

Die hier verwendeten Aufgaben zur visuell-räumlichen Arbeitsgedächtnis- und Kurzzeitgedächtniskapazität belegen, dass die Verarbeitungskapazität im hier beobachteten Alterszeitraum zunimmt. So zeigte sich erstens ein Anstieg der Arbeitsgedächtniskapazität zwischen 9 Jahren und dem Erwachsenenalter, der durch einen Entwicklungssprung zwischen dem 13. Lebensjahr und dem Erwachsenenalter gekennzeichnet ist. Dieser Verlauf ist konsistent mit den Entwicklungsverläufen der visuell-räumlichen Arbeitsgedächtniskapazität (Alloway, Gathercole & Pickering, 2006; Luciana, Conklin, Hooper & Yarger, 2005; Myatchin & Lagae, 2013) bzw. anderen Aspekten der Arbeitsgedächtniskapazität (Conklin, Luciana, Hooper & Yarger, 2007; Gathercole et al., 2004), die in früheren Studien beobachtet wurden.

Daneben zeigte sich in den vorliegenden Daten auch ein Anstieg der Kurzzeitgedächtniskapazität über den gesamten untersuchten Altersbereich. Zwar ist nur der

Unterschied zwischen den extremen Altersgruppen statistisch bedeutsam, nichtsdestotrotz ist numerisch über den gesamten Altersbereich ein linearer Kapazitätsanstieg zu beobachten. Dass die Unterschiede zwischen den benachbarten Altersgruppen sich nicht als statistisch bedeutsam erwiesen, ist möglicherweise auf eine zu geringe Teststärke zurückzuführen. Der hier beobachtete Entwicklungsverlauf der Kurzzeitgedächtniskapazität ist konsistent mit den Befunden früherer Studien, die einen linearen Anstieg der Corsi-Spanne ab 4 Jahren bis 14 oder 15 Jahren und dann ein Abflachen der Lernkurve beobachteten (Fry & Hale, 2000; Gathercole et al., 2004; Logie & Pearson, 1997; Orsini, 1994). Im Vergleich zur Entwicklung der Arbeitsgedächtniskapazität verläuft die Entwicklung der Kurzzeitgedächtniskapazität über den untersuchten Altersbereich stärker linear und es ist kein Entwicklungssprung zwischen dem 13. Lebensjahr und dem Erwachsenenalter zu beobachten. Dies lässt einen schnelleren Entwicklungsverlauf der Kurzzeitgedächtniskapazität als der Arbeitsgedächtniskapazität vermuten.

### **5.3.4 Altersabhängiger Effekt der Load auf die Auflösung der Aufmerksamkeit**

Die Ergebnisse der Kontrastanalyse deuten darauf hin, dass die in Experiment 1 für eine bestimmte Altersgruppe beobachtete Auflösung der Aufmerksamkeit in hohem Maße damit korreliert, wie stark die Zunahme des kritischen Abstands von zwei zu drei Zielreizen in dem jeweiligen Altersbereich ausgeprägt ist. Gleichzeitig gibt es innerhalb der Daten jedoch auch ein Teilergebnis, das von diesem Gesamtmuster abweicht. So zeigen, entgegen der Vorhersage, die Dreizehnjährigen im Vergleich zu den Elfjährigen eine, wenn auch nur marginal signifikante, Veränderung des Schwellenwert-Differenzwertes, die zudem entgegen der über den gesamten Entwicklungsverlauf hinweg vorhergesagten Richtung verläuft. Bei den Dreizehnjährigen hat eine Zunahme der Zielreizanzahl also einen stärker beeinträchtigenden Effekt als dies bei den Elfjährigen der Fall ist. Wie lässt sich dieses nicht erwartungskonforme Ergebnis erklären? Eine ressourcenbasierte Erklärung ist wenig plausibel, denn sowohl die Tests zum Arbeits- und Kurzzeitgedächtnis der vorliegenden Arbeit als auch verschiedene weitere Studien (z.B. Gathercole et al., 2004; Trick et al., 2009; vgl. 2.8.2) zeigen, dass Jugendliche, konträr zum Verlauf der Schwellenwert-Differenzen, in diesem Altersbereich einen Anstieg oder zumindest gleichbleibende Werte der Verarbeitungskapazität aufweisen. Plausibler ist eine Erklärung, die eine Umstrukturierung kognitions- bzw. wahrnehmungsbezogener Mechanismen zu Beginn der Pubertät einbezieht. So zeigen verschiedene Studien, dass Gesichter zu Beginn der Pubertät (d.h. mit 12 bis 13 Jahren) schlechter verarbeitet werden als in den vorhergehenden Lebensjahren (Carey, Diamond & Woods, 1980; Diamond, Carey & Back, 1983; McGivern, Andersen, Byrd,

Mutter & Reilly, 2002). Verallgemeinert könnten diese Ergebnisse auf Probleme hinweisen, komplexere Stimulusanordnungen (z.B. die Teile des Gesichts) zu repräsentieren, wie sie auch mit zunehmender Anzahl zu verfolgender Objekte entstehen. Die Autoren der eben genannten Studien führen den Leistungsabfall hinsichtlich der Repräsentation komplexer Stimulusanordnungen um den Beginn der Pubertät auf neuronale Faktoren zurück. In diesem Altersbereich kommt es im präfrontalen Cortex zu einer massenhaften Bildung von Synapsen (Giedd et al., 1999), die möglicherweise in einem geringeren Signal-zu-Rausch-Verhältnis der Verarbeitung resultieren (Blakemore, 2008). Es wäre denkbar, dass dieser Entwicklungseinbruch auch den vorliegenden Daten zugrunde liegt. Eine weitere mögliche Erklärung des unerwartet hohen Differenzwertes der Dreizehnjährigen könnte jedoch auch auf statistischer Ebene zu finden sein. Der hohe Differenzwert ist in den mittels lokaler linearer Regression ermittelten Daten nicht zu finden. Im Gegenteil ist die Zunahme der Schwelle von zwei zu drei Zielreizen bei den Dreizehnjährigen bei dieser Analysemethode zumindest numerisch geringer als bei den Elfjährigen. Die Widersprüchlichkeit der mit unterschiedlichen statistischen Verfahren gewonnenen Ergebnisse wirft die Frage auf, ob es sich bei dem hohen Differenzwert der Dreizehnjährigen, welcher auf Basis der individuellen Schwellenwerte ermittelt wurde, um ein Artefakt der Datenauswertung handeln könnte. Zukünftige Untersuchungen sollten darauf achten, die inferenzstatistische Auswertung mit sensitiveren Methoden der Schwellenbestimmung – z.B. adaptiven Verfahren – zu kombinieren.

Ebenso könnte eingewendet werden, dass die Unterschiede in den Schwellenwert-Differenzen der Altersgruppen teilweise dadurch zustande kamen, dass die verschiedenen Altersgruppen unterschiedliche Trackingkapazitäten (d.h. Menge der Objekte, die sie maximal verfolgen können) aufweisen. So läge es nahe zu vermuten, dass die hohe Schwellenwert-Differenz der Neunjährigen darauf beruht, dass die Kinder zwar in der Lage waren, zwei, aber nicht drei Objekte zu verfolgen. Tatsächlich können in früheren Studien von Trick und Kollegen (Trick et al., 2009; Trick et al., 2005) Kinder erst ab 10 Jahren drei Objekte verfolgen, für Achtjährige werden noch zwei Objekte als Grenzwert angegeben. Für neunjährige Kinder ist somit nicht eindeutig belegt, ob sie bereits drei Objekte verfolgen können. Es gibt jedoch verschiedene Aspekte in den Daten, die darauf hindeuten, dass der höhere kritische Abstand der Neunjährigen bei drei Objekten nicht darauf zurückzuführen ist, dass mit drei Objekten bereits ihre Trackingkapazität überschritten wird. Erstens zeigen sie in der leichtesten Abstandsbedingung bei zwei und drei Objekten vergleichbare Leistungen, was darauf hindeutet, dass sie zum Verfolgen beider Anzahlen von Objekten ähnlich gut in der Lage sind. Zweitens zeigen sie, ebenfalls in der leichtesten Bedingung, die gleiche Leistung wie die



Elfjährigen, die, zumindest gemäß der Studien von Trick und Kollegen, ohne Probleme in der Lage sind, drei Objekte zu verfolgen. Schließlich zeigen die Neunjährigen auch bei drei Zielreizen in den leichteren Abstandsbedingungen noch einen Anstieg der Leistung, was darauf hindeutet, dass ihre geringe Leistung in den schwierigeren Abstandsbedingungen eher durch den Objektabstand als durch die Anzahl der Objekte bedingt ist.<sup>19</sup> Da also anzunehmen ist, dass die neunjährigen Kinder in der vorliegenden Studie bereits drei Objekte verfolgen konnten, kann ausgeschlossen werden, dass dieser Aspekt die Daten der Neunjährigen (im Gegensatz zu den anderen Altersgruppen) besonders beeinflussen würde.

Die Ergebnisse der Kontrastanalyse deuten also in der Summe darauf hin, dass die jüngeren Altersgruppen durch eine Verringerung der Ressourcen, die zum Verfolgen eines einzelnen Objektes zur Verfügung stehen, besonders darin beeinträchtigt werden, den Fokus der Aufmerksamkeit zusammenzuziehen. Welcher Mechanismus könnte dem zugrunde liegen? Wie auch die Erwachsenen zeigen die Kinderstichproben einen Anstieg in den Schwellenwerten von zwei zu drei Objekten, was darauf hindeutet, dass auch die Kinder ihre Verarbeitungsressourcen zwischen der Kontrolle der Größe des Aufmerksamkeitsfokus und der Anzahl der Zielreize flexibel verteilen. Werden mehr Objekte selektiert, stehen pro Objekt weniger Ressourcen zur Verfügung, um den Fokus der Aufmerksamkeit zusammenzuziehen. Der Aufmerksamkeitsfokus bleibt somit größer und es besteht eine erhöhte Wahrscheinlichkeit, dass auch Distraktoren in die Selektionsregion gelangen und Zielreiz und Distraktor vertauscht werden. Sind in einer Altersgruppe weniger Verarbeitungsressourcen vorhanden, worauf die Tests zum Arbeitsgedächtnis und Kurzzeitgedächtnis bei den jüngeren Altersgruppen hinweisen, sind weniger Ressourcen zu verteilen und der Aufmerksamkeitsfokus kann noch weniger zusammengezogen werden. Dieser Zusammenhang wird auf individueller Ebene dadurch bestätigt, dass sich dort ein Zusammenhang zwischen der Schwellenwert-Differenz und den beiden Gedächtnismaßen zeigte, der sich bei Auspartialisierung des Faktors Altersgruppe zwar verringerte, jedoch auch danach sichtbar blieb. Dies deutet darauf hin, dass es sich bei dem Zusammenhang zwischen Größe des Aufmerksamkeitsfokus und Menge der vorhandenen Verarbeitungsressourcen um einen über das Alter hinweg stabilen Effekt handelt. Es liegt somit nahe, den Mechanismus, der generell dem Anstieg des kritischen Abstandes mit zunehmender Zielreizanzahl zugrunde liegt, auch als Grundlage der Entwicklung der Auflösung der Aufmerksamkeit über das

---

<sup>19</sup> Im Gegensatz dazu zeigen die Daten der Siebenjährigen, dass diese Altersgruppe nur bedingt in der Lage war, zwei Objekte zu verfolgen und drei Objekte gar nicht mehr verfolgen konnte. Dieses Ergebnis deckt sich mit den Daten von Trick, Jaspers-Fayer und Sethi (2005), die beobachteten, dass Sechsjährige lediglich zwei Objekte verfolgen können (siehe jedoch O'Hearn, Hoffman und Landau (2010) und O'Hearn, Landau und Hoffman (2005) für bereits erwachsenenähnliche Werte mit 6 Jahren).

Kindes- und Jugendalter hinweg zu vermuten. Zusammenfassend scheint es also, als sei die in Experiment 1 beobachtete Entwicklung der Auflösung der Aufmerksamkeit darauf zurückzuführen, dass den jüngeren Altersgruppen nicht ausreichend Verarbeitungsressourcen zur Verfügung stehen, um den Fokus der Aufmerksamkeit der Aufgabe angemessen zusammenzuziehen.

### **5.3.5 Vergleiche mit verwandten Studien**

Das Ergebnis der vorliegenden Untersuchung weist Überschneidungen mit den Befunden verwandter Studien auf. Es ist zunächst einmal prinzipiell vereinbar mit der Studie von Akhtar und Enns (1989), in welcher die Einschränkung der Diskriminationsleistung durch einen in der Nähe des Zielreizes platzierten Distraktor selbst bei Fünfjährigen aufgehoben werden konnte, wenn an der Stelle, an der Ziel- und Flankierreiz dargeboten wurden, die Aufmerksamkeitsressourcen vorab durch einen exogenen Hinweisreiz konzentriert worden waren. Diese Studie zeigt wie die vorliegende, dass die Manipulation der an einem Ort des visuellen Feldes vorhandenen Ressourcen die Güte der Verarbeitung an diesem Ort verändert. Im Gegensatz zu der Studie von Akhtar und Enns lässt der Aufbau der vorliegenden Studie jedoch den Schluss zu, dass die Manipulation der Ressourcenmenge tatsächlich eine Veränderung des *räumlichen* Aufmerksamkeitsprofils bewirkt. In der Studie von Akhtar und Enns bleibt hingegen unklar, was sich genau durch die Manipulation der Ressourcenmenge verändert, da in dieser Studie der Zielreiz-Distraktor-Abstand nicht manipuliert wird und somit das Aufmerksamkeitsprofil nicht ermittelt werden kann. Diese Studie lässt daher lediglich Aussagen darüber zu, ob die Größe des Aufmerksamkeitsfokus einer Altersgruppe einen bestimmten Wert unterschreitet. Weitere Differenzierungen sind hingegen nicht möglich. Aus demselben Grund kann die Studie von Akhtar und Enns auch keine genaueren Aussagen darüber machen, ob die Selektionsregionen der verschiedenen Altersgruppen nach der Konzentration der Aufmerksamkeitsressourcen unterschiedliche oder dieselben Größen aufweisen. Die vorliegende Untersuchung belegt jedoch, dass die minimale Größe der Selektionsregion sich auch dann, wenn die Aufmerksamkeitsressourcen stärker konzentriert werden (wie im Falle von zwei im Vergleich zu drei Zielreizen), zwischen den Altersgruppen unterscheidet. Daneben zeigt die vorliegende Studie, dass der Effekt räumlich präziserer Selektion bei mehr Aufmerksamkeitsressourcen auch dann zutrifft, wenn die Aufmerksamkeitsressourcen nicht exogen, wie in der Studie von Akhtar und Enns, sondern endogen zugewiesen werden. Dies ist bereits bei siebenjährigen Kindern der Fall. Nimmt man die Studie von Akhtar und Enns und die vorliegenden Ergebnisse zusammen, lässt sich also festhalten, dass die Menge der in einem bestimmten Bereich des visuellen Feldes

vorhandenen Aufmerksamkeitsressourcen einen Einfluss auf die minimale Größe des Aufmerksamkeitsfokus in diesem Bereich des visuellen Feldes hat. Dabei scheint die Manipulation der räumlichen Verteilung der Verarbeitungsressourcen in den verschiedenen Altersgruppen unterschiedliche Auswirkungen auf die minimale Größe des Aufmerksamkeitsfokus zu haben. Dies ist vermutlich auf die unterschiedliche Verarbeitungskapazität der verschiedenen Altersgruppen zurückzuführen.

Die vorliegenden Ergebnisse weisen zudem bedeutsame Parallelen zu der Studie von Cowan et al. (2010) auf, die zeigen, dass die Fähigkeit zur Selektion eingeschränkt ist, wenn gleichzeitig zu viele Informationen im Arbeitsgedächtnis aufrechterhalten werden müssen und dass dieser Effekt bei Kindern, die eine geringe Arbeitsgedächtniskapazität haben, bereits bei weniger zu repräsentierenden Objekten eintritt. Im Gegensatz zur vorliegenden Studie, in der Verarbeitungskapazität als Aufmerksamkeitskapazität verstanden wird, wird bei Cowan et al. Verarbeitungskapazität als Arbeitsgedächtniskapazität konzeptualisiert, und während sich in der vorliegenden Studie die Einschränkungen, die aus mangelnden Verarbeitungsressourcen resultieren, auf die *räumlichen* Aspekte der Selektion beziehen, beobachteten Cowan et al. Einschränkungen der *eigenschaftsbasierten* Selektion. Der Zusammenhang „weniger Verarbeitungsressourcen – eingeschränkte Selektion“ als Entwicklungsprinzip scheint also ein allgemeineres Prinzip zu sein, das sich auf verschiedene Modi der Repräsentation (Arbeitsgedächtnis oder Aufmerksamkeit) und auf verschiedene Aspekte von Selektion (eigenschaftsbezogen oder räumlich) beziehen kann. Die vorliegenden Ergebnisse stützen somit eine sich gerade entwickelnde Sichtweise, gemäß der Verbesserungen in der Güte der Selektion mit zunehmendem Alter auf eine zunehmende Menge von Verarbeitungsressourcen zurückgeführt werden können.

### **5.3.6 Ursachen der entwicklungsbedingten Zunahme der Verarbeitungskapazität**

Die vorliegenden Ergebnisse lassen sich, wie auch die Ergebnisse der Studie von Cowan et al. (2010), in eine generellere Entwicklungstheorie einordnen, in der davon ausgegangen wird, dass die Entwicklung kognitiver Fähigkeiten in einer Zunahme der Verarbeitungsressourcen begründet liegt (z.B. Halford et al., 1998; Pascual-Leone, 1970). Die Frage, warum mit zunehmendem Alter besser selektiert werden kann, wandelt sich somit in die weiterführende allgemeinere Frage, warum die Verarbeitungsressourcen zunehmen. Diese Frage wurde bisher vorwiegend in der Forschung zur Entwicklung des Arbeitsgedächtnisses aufgegriffen und ist auch dort bisher nicht geklärt (Barrouillet & Gaillard, 2011a; Cowan, 2013). Stattdessen stehen verschiedene Vorschläge im Raum. So gehen Cowan und Kollegen (Cowan, 2013; Cowan & Alloway, 2009; Cowan, AuBuchon, Gilchrist, Ricker & Saults, 2011) von einer

grundlegenden Zunahme der Arbeitsgedächtniskapazität aus, die letzten Endes auf neuronalen Ursachen basiert (Cowan et al., 2010). Daneben wurde vorgeschlagen, dass nicht die Menge der Ressourcen an sich, sondern die Menge der *verfügbaren* Ressourcen zunimmt. Hier kommen mehrere Mechanismen infrage, die einem Zuwachs an verfügbaren Ressourcen zugrunde liegen könnten. Erstens könnte eine Zunahme der Effizienz der Verarbeitung dazu führen, dass letzten Endes funktionell mehr Ressourcen vorhanden sind. Diese Sichtweise impliziert die Idee, dass die verarbeitenden Strukturen sich verändern und weniger Ressourcen brauchen (Case, Kurland & Goldberg, 1982; Demetriou & Mouyi, 2011). Ein weiterer Aspekt, der als Ursache für eine größere Menge verfügbarer Ressourcen betrachtet werden könnte, ist die Zunahme der Verarbeitungsgeschwindigkeit. Dieser für viele kognitive Aufgaben beobachtete Entwicklungsfaktor wurde auch als eigenständiger Motor der Entwicklung vorgeschlagen (Kail, 1991). Gleichzeitig ist jedoch denkbar, dass die Verarbeitungsgeschwindigkeit die Ursache einer erhöhten Verarbeitungskapazität darstellt (Cowan, 2013; Fry & Hale, 2000; für eine Darstellung bezüglich des engen Zusammenhangs zwischen Verarbeitungskapazität und Verarbeitungsgeschwindigkeit siehe Fry & Hale, 1996). Ein elaborierter Vorschlag, wie der Zusammenhang zwischen Verarbeitungskapazität und Verarbeitungsgeschwindigkeit näher ausgestaltet sein könnte, kommt von Barrouillet und Kollegen (Barrouillet, Bernardin & Camos, 2004; Barrouillet & Camos, 2007). Diese gehen in ihrem *Time-Based-Resource-Sharing-Modell* (TBRS-Modell) des Arbeitsgedächtnisses davon aus, dass die Inhalte des Arbeitsgedächtnisses von selbst verfallen, wenn sie nicht aufgefrischt werden. Dieses Auffrischen werde durch Aufmerksamkeit geleistet. In Arbeitsgedächtnisaufgaben könne das Auffrischen jedoch nicht durchgängig stattfinden, sondern wechsele sich sequentiell mit dem Verarbeiten von Informationen ab. Bezüglich der Entwicklung des Arbeitsgedächtnisses schlagen sie nun vor, dass die Entwicklung der Arbeitsgedächtniskapazität darauf zurückzuführen ist, dass die Geschwindigkeit der Verarbeitung und damit die Geschwindigkeit, mit der zwischen Verarbeitung und Auffrischung hin- und hergewechselt werden kann, zunimmt (Barrouillet, Gavens, Vergauwe, Gaillard & Camos, 2009). Dadurch können mehr Informationen aufrechterhalten werden.

Diese genannten Erklärungsansätze sind prinzipiell alle für die vorliegenden Daten denkbar, und können mit den hier verwendeten experimentellen Vorgehensweisen nicht bewertet werden. Ungeachtet des genauen Mechanismus, der der Zunahme der Verarbeitungskapazität zugrunde liegt, ist daher möglicherweise der kleinste gemeinsame Nenner, dass im Laufe der Entwicklung die Menge der *verfügbaren* Ressourcen zunimmt. Weitere Forschung ist nötig,

um zwischen den verschiedenen Alternativen zu unterscheiden und somit die Faktoren, die der Zunahme der Verarbeitungskapazität zugrunde liegen, zu ermitteln.

### **5.3.7 Schlussfolgerung**

Die vorliegende Studie zeigt, dass die Entwicklung der Auflösung der Aufmerksamkeit auf die verminderte Verfügbarkeit von Verarbeitungsressourcen von Kindern zurückzuführen ist. Wie die verminderte Verfügbarkeit von Verarbeitungsressourcen jedoch letzten Endes begründet ist, ist in zukünftigen Studien zu klären. Hinweise kann hier möglicherweise die Betrachtung der neurokognitiven Mechanismen liefern, durch welche die Selektion an der Grenze der Auflösung der Aufmerksamkeit bewerkstelligt wird. Mit diesem Aspekt befasst sich das folgende Experiment.

## 6 Experiment 3: Neuronale Grundlagen der Entwicklung der Auflösung der Aufmerksamkeit

Experiment 3 zielte darauf ab, die neuronalen Grundlagen der in Experiment 1 beobachteten Entwicklung der Auflösung der Aufmerksamkeit zu identifizieren. Zur Untersuchung der Fragestellung wurde wie in Experiment 1 eine Object-Tracking-Aufgabe (Pylyshyn & Storm, 1988) mit einem Zielreiz verwendet, bei der der Abstand zwischen dem zu verfolgenden Zielreiz und den Distraktoren variiert wurde. Zur Untersuchung der neuronalen Aktivität, die mit den verschiedenen Zielreiz-Distraktor-Abständen einherging, wurde, während die Probanden die Object-Tracking-Aufgabe absolvierten, mittels fMRT die Höhe der neuronalen Aktivierungen registriert und diese anschließend zwischen den Altersgruppen verglichen. Das soeben skizzierte Vorgehen wird in diesem Kapitel detailliert beschrieben.

### 6.1 Methode

In diesem Abschnitt wird zunächst die Operationalisierung der psychologischen Hypothesen erläutert (6.1.1). Es folgt die Beschreibung der Stichprobe (6.1.2) und der experimentellen Vorgehensweise (6.1.3). Im Anschluss wird das Vorgehen bei der Gewinnung (6.1.4) und Auswertung (6.1.5) der fMRT-Daten beschrieben. Aufbauend auf diesen Informationen erfolgt am Ende des Abschnitts die Formulierung der statistischen Hypothesen (6.1.6).

#### 6.1.1 Operationalisierung und Design

##### *Auswahl der Altersgruppen*

Da mit der vorliegenden Untersuchung die Grundlagen der Entwicklung der Auflösung der Aufmerksamkeit aus Experiment 1 untersucht werden sollten, wurde bei der Auswahl der Altersgruppen die gleiche Altersspanne wie in Experiment 1 berücksichtigt. Um einen *Entwicklungsverlauf* zeichnen zu können (und nicht nur Kinder mit Erwachsenen zu vergleichen), wurden zwei Kindergruppen und eine Erwachsenenengruppe in die Untersuchung aufgenommen. Als jüngere Kindergruppe wurde der Altersbereich um 7 Jahre ausgewählt, da diese Altersgruppe das untere Ende des Altersspektrums in Experiment 1 darstellte. Für die Auswahl der älteren Kindergruppe sollte aus dem Spektrum der in Experiment 1 getesteten Altersgruppen ein Altersbereich gewählt werden, der deutlich über 7 Jahren liegt, aber noch nicht in das Jugendalter fällt, da im Jugendalter vermutlich Entwicklungsprozesse ablaufen, die sich deutlich von denen der Kindheit unterscheiden (Uhlhaas, 2011). Daneben sollte die ausgewählte Altersgruppe eine sich von den Siebenjährigen unterscheidende Leistung zeigen (hierfür wurden die Ergebnisse von Experiment 1 herangezogen), um ähnliche

Leistungsniveaus durch verschiedene Untersuchungsbedingungen herstellen zu können. Die Altersgruppe, die alle diese Kriterien erfüllte, war die der Elfjährigen. Diese Altersgruppe wurde neben den Siebenjährigen als Kinderstichprobe in die Untersuchung mit aufgenommen.

### ***Verhaltensexperiment***

#### *Versuchsaufbau*

Zur Untersuchung der neuronalen Grundlagen der Entwicklung der Auflösung der Aufmerksamkeit wurde wie in Experiment 1 das Object-Tracking-Paradigma mit einem Zielreiz und variierendem Zielreiz-Distraktor-Abstand verwendet. Die Variation des Abstandes zielte bei Experiment 3 jedoch nicht darauf ab, einen kritischen Abstand für die verschiedenen Altersgruppen zu ermitteln. Stattdessen sollten mit den unterschiedlichen Abstandsbedingungen unterschiedliche Anforderungen an die räumliche Präzision der Selektion gestellt werden, deren neuronale Aktivität dann verglichen werden sollte.

Die Abstandsbedingungen wurden so gewählt, dass sich die Zielreiz-Distraktor-Abstände im Größenbereich des kritischen Abstandes befanden. Die konkreten Zielreiz-Distraktor-Abstände wurden anhand der Leistungen in Experiment 1 festgelegt. Bei der Auswahl der Abstandsbedingungen wurde darauf geachtet, dass für jede der ausgewählten Altersgruppen jeweils eine Bedingung vorhanden war, in der sich die Leistung dem optimalen Leistungsniveau annäherte und eine Bedingung, in der eine Leistung im Bereich der absoluten Schwelle (75 % in Experiment 1; vgl. 4.1.1) gezeigt wurde. Es wurde davon ausgegangen, dass eine Bedingung, in der eine Leistung im Bereich der absoluten Schwelle gezeigt wird, mit einem stärker zusammengezogenen Fokus der Aufmerksamkeit und damit höherer Anstrengung einhergeht, als dies bei einer Bedingung der Fall ist, in der eine fast optimale Leistung gezeigt wird. Außerdem wurde darauf geachtet, dass unter den ausgewählten Bedingungen solche sein würden, in denen unterschiedliche Altersgruppen ein ähnliches Leistungsniveau aufweisen würden. Diese Gesichtspunkte berücksichtigend wurden die Abstandsbedingungen 2.8, 5.6, 8.4 und 11.2 Winkelminuten ausgewählt. Gleichzeitig wurde festgelegt, dass die Altersgruppe der Siebenjährigen nur die drei größeren Abstandsbedingungen absolvieren sollte, da sich in Experiment 1 gezeigt hatte, dass die Leistung dieser Altersgruppe bei einem Zielreiz-Distraktor-Abstand von 2.8 Winkelminuten auf Zufallsniveau liegt. Hieraus lässt sich wiederum schließen, dass die Siebenjährigen nicht in der Lage sind, diese Abstandsbedingung annähernd erfolgreich zu bewältigen.

Neben den drei bzw. vier Abstandsbedingungen wurde allen Altersgruppen zudem eine Baseline-Bedingung (vgl. *Analyse* unter *Funktionelle Magnetresonanztomographie* weiter unten im selben Abschnitt) präsentiert. In den Durchgängen dieser Bedingung, die

hinsichtlich des zeitlichen Ablaufs den Experimentaldurchgängen sehr ähnlich aufgebaut waren, sahen die Probanden dasselbe Display mit denselben acht Punkten wie in den Experimentaldurchgängen. Im Gegensatz zu den Experimentaldurchgängen wurde jedoch in den Baseline-Durchgängen keiner der Punkte als Zielreiz markiert und die Punkte bewegten sich nur eingeschränkt, d.h. mit einer Random-Walk-artigen Bewegung, innerhalb des Trackingfeldes. In dieser Bedingung sollte keine Antwort gegeben werden. Die Probanden waren lediglich instruiert, die Punkte passiv zu betrachten.

Kreuzt man die Abstandsbedingungen in der Object-Tracking-Aufgabe mit den untersuchten Altersstufen ergibt sich ein zweifaktorielles Design, in dem der erste Faktor Altersgruppe interindividuell und der zweite Faktor Abstand intraindividuell variiert wurde. Zusätzlich wurden allen Altersgruppen Durchgänge der Baseline-Bedingung dargeboten. Tabelle 6.1 stellt das Design zusammenfassend dar.

Tabelle 6.1: Versuchsplan des Object-Tracking-Experiments mit den beiden Faktoren Alter und Abstand.

		UV B: Abstand				
		2	5.6	8.4	11.2	Baseline
UV A: Altersgruppe	7 Jahre		$Y_{i11}$	$Y_{i12}$	$Y_{i13}$	$Y_{i14}$
	11 Jahre	$Y_{i21}$	$Y_{i22}$	$Y_{i23}$	$Y_{i24}$	$Y_{i25}$
	Erwachsene	$Y_{i31}$	$Y_{i32}$	$Y_{i33}$	$Y_{i34}$	$Y_{i35}$

Anmerkungen. UV, unabhängige Variable.

Das in Experiment 1 und 2 verwendete Probe-One-Format (vgl. 4.1.1) ist mit dem Nachteil behaftet, dass die einzelnen Durchgänge eine hohe Ratewahrscheinlichkeit aufweisen und man für einen konkreten Durchgang nur mit einer Sicherheit von 50 % sagen kann, ob die Person den Zielreiz oder ein anderes Objekt verfolgt hat. Da ursprünglich nur die Durchgänge in die weitere Auswertung einbezogen werden sollten, von denen man sicher sagen konnte, dass der Zielreiz in ihnen erfolgreich verfolgt worden war, erwies sich das Probe-One-Format für die vorliegende Untersuchung als ungeeignet. Bei der von einigen Autoren alternativ verwendeten Mark-All-Methode (Hulleman, 2005; vgl. 4.1.1) markiert der Proband am Ende des Durchgangs, meist mithilfe der Computermouse, alle Zielreize. Hier entspricht die Ratewahrscheinlichkeit dem Anteil der Zielreize an der Gesamtanzahl der Punkte und ist somit für einen einzelnen Punkt deutlich geringer als bei der Probe-One-Methode. Aus diesem Grund wurde die Mark-All-Methode für die vorliegende Arbeit gewählt. Gleichzeitig wurde der Antwortmodus jedoch für die MRT-Umgebung angepasst. Wie in 4.1.1 erläutert, ist es



wahrscheinlich, dass jüngere Kinder im Vergleich zu älteren Kindern und Erwachsenen weniger geübt im Umgang mit der Computermouse sind und es ist anzunehmen, dass diese mangelnde Übung sich noch stärker auf die Leistung auswirkt, wenn eine Computermouse in der ungewohnten Umgebung eines MRT-Gerätes bedient werden soll. Da somit zu vermuten war, dass der Antwortmodus mit Computermouse die Ergebnisse der verschiedenen Altersgruppen unterschiedlich beeinflussen würde, wurde von dessen Verwendung abgesehen. Stattdessen wurde ein verbales Antwortformat gewählt, da anzunehmen ist, dass dieses allen Altersgruppen ähnlich leicht fällt. Um die Punkte in der Antwortphase benennbar zu machen, wurden sie im Anschluss an die Trackingphase in Zahlen umgewandelt. Das Zahlenformat wurde gewählt, da Zahlen, im Gegensatz zu Unterschieden in Farbe und Form, für die Probanden auf dem MRT-Display gut erkennbar waren.

#### *Statistische Auswertung*

Im Rahmen der statistischen Auswertung wurde zunächst für jede Versuchsperson der Anteil korrekter Antworten pro Abstandsbedingung errechnet. Basierend auf den so aggregierten Daten wurden zwei zweifaktorielle ANOVAs mit Messwiederholung gerechnet, mit denen der Einfluss des Zwischensubjektfaktors Altersgruppe und des Messwiederholungsfaktors Abstand auf die Genauigkeit in der Trackingaufgabe getestet werden sollte. Die Berechnung zweier ANOVAs war notwendig, da die Siebenjährigen die kleinste Abstandsbedingung nicht absolviert hatten, und es nur auf diese Weise möglich war, die gesamten Daten varianzanalytisch abzudecken. In der ersten ANOVA wurden alle Altersgruppen (7 Jahre, 11 Jahre und Erwachsene) in den drei Abstandsbedingungen, die von allen Altersgruppen absolviert worden waren (5.6, 8.4 und 11.2 Winkelminuten), analysiert. In die zweite ANOVA gingen für den Faktor Altersgruppe nur die beiden älteren Altersgruppen (11 Jahre und Erwachsene), für den Faktor Abstand aber alle Abstandsbedingungen (2.8, 5.6, 8.4 und 11.2 Winkelminuten) ein. Zum Vergleich einzelner Faktorenstufen wurden geplante (die Hypothesen betreffende) oder post-hoc *t*-Tests mit Bonferroni-Korrektur für multiple Vergleiche gerechnet. Die korrigierten  $\alpha$ -Niveaus der einzelnen Vergleiche werden im Kontext der jeweiligen Analyse angegeben.

#### ***Funktionelle Magnetresonanztomographie***

Um die neuronalen Korrelate der Auflösung der Aufmerksamkeit zu untersuchen, wurde die funktionelle Magnetresonanztomographie (fMRT) gewählt. Das folgende Kapitel gibt eine Einführung in die Bildgebung mittels (funktioneller) MRT. Hierzu werden zunächst die physikalischen und physiologischen Grundlagen dieses Verfahrens erklärt und anschließend die Grundzüge der statistischen Auswertung beschrieben. Die Darstellung orientiert sich

dabei, soweit nicht anders vermerkt, an den Texten von Huettel, Song und McCarthy (2009), Hendrix (2003) und Heeger und Ress (2002).

### *Physikalische und physiologische Grundlagen*

Bei der fMRT handelt es sich um eine non-invasive bildgebende Technik, welche die magnetischen Eigenschaften des Blutes nutzt, um neuronale Aktivität zu messen (Ogawa, Lee, Kay & Tank, 1990). Das MR-Signal basiert auf den physikalischen Eigenschaften der Wasserstoffprotonen, die in großer Anzahl in den Wassermolekülen des Gehirns vorhanden sind. Diese Protonen rotieren (sie haben eine *Eigendrehung* bzw. einen *Spin*) und besitzen dadurch eine Richtung und ein magnetisches Moment. Im feldfreien Raum sind die Protonen zufällig orientiert, mit der Herstellung eines äußeren Magnetfeldes richten sie sich jedoch entweder parallel oder anti-parallel zu den Feldlinien des magnetischen Feldes aus. Hierbei orientiert sich ein etwas größerer Anteil der Protonen parallel zum magnetischen Feld, da dies die energetisch günstigere der beiden möglichen Ausrichtungen ist. Diese Ungleichverteilung der Orientierungen wird als *energetisches Gleichgewicht* bezeichnet. Sie resultiert in einer (schwachen) Netto-Magnetisierung des Protonenensembles in Richtung der Feldlinien. Diese Magnetisierung wird auch als *Längsmagnetisierung* bezeichnet. In einem statischen Magnetfeld rotieren die Protonen jedoch nicht nur um die eigene Achse, sie beschreiben zusätzlich eine kegelförmige Rotationsbewegung um die Feldlinien. Diese Bewegung wird als *Präzession* bezeichnet und ihre Geschwindigkeit (*Larmorfrequenz*) ist abhängig von der Stärke des externen Magnetfeldes.

Bringt man nun einen *Hochfrequenzpuls* (HF-Puls) mit Larmorfrequenz in das Magnetfeld, verändern sich zwei Dinge. Erstens verändern sich die relativen Phasen der Spins. Der HF-Puls bewirkt, dass die Spins nun phasengleich rotieren. Zweitens verändert der HF-Puls die Ausrichtung der Spins. Sie präzedieren nun nicht mehr um die Achse des externen Magnetfeldes, sondern um die Achse des Magnetfeldes, das durch den HF-Puls erzeugt wird. Die ursprüngliche Längsmagnetisierung der Spins wird somit in die Ebene verteilt, die orthogonal zu den Feldlinien des externen Magnetfeldes steht. Sowohl die Veränderung der Präzessionsachse als auch die oben genannte Phasenangleichung der Spins bewirken, dass eine *Quermagnetisierung* entsteht, d.h. eine Magnetisierung orthogonal zur oben genannten Längsmagnetisierung. Diese Quermagnetisierung erzeugt in einer Spule, die man in das Magnetfeld des HF-Pulses einbringt, eine Spannung, die gemessen werden kann. Der zeitliche Verlauf dieser Spannung ist das MR-Signal. Es ist umso größer, je stärker die Quermagnetisierung ist.

Nach Beendigung des HF-Pulses kehren die Protonen in den energetischen Gleichgewichtszustand zurück (*Relaxation*). Die Rückkehr in diesen Zustand kann durch zwei voneinander unabhängige Prozesse beschrieben werden. Erstens baut sich die Längsmagnetisierung wieder auf (*Längsrelaxation*). Die Veränderung der Magnetisierung folgt dabei einem exponentiellen Verlauf. Der Zeitpunkt, zu dem die Längsmagnetisierung wieder 63 % ihres Ausgangswertes erreicht hat, wird als  $T_1$  bezeichnet. Ursache für die  $T_1$ -Relaxation sind lokale Magnetfeldschwankungen, die durch die (im Prinzip durchgehend vorhandene) Molekularbewegung innerhalb des Atomverbundes (*Gitter*) hervorgerufen werden und die Ausrichtung der Präzessionsachsen der Spins verändern (*Spin-Gitter-Relaxation*). Zweitens wird die Quermagnetisierung abgebaut (*Querrelaxation*). Der Abbau verläuft ebenfalls exponentiell und der Zeitpunkt, an dem 63 % des Ausgangswertes erreicht sind, wird als  $T_2$  bezeichnet. Verantwortlich für die Querrelaxation sind einerseits die gleichen lokalen Magnetfeldschwankungen, die auch die Längsrelaxation bewirken. Andererseits führt die mit der Längsrelaxation einhergehende Veränderung der Ausrichtung der Spins dazu, dass die Phasenkohärenz der Spins verloren geht. Dieser Prozess wird im Falle der Querrelaxation dadurch beschleunigt, dass die nicht mehr phasengleich rotierenden Spins sich gegenseitig beeinflussen (*Spin-Spin-Wechselwirkung*). Beide Prozesse bewirken, dass die Phasenkohärenz der Spins verloren geht und damit die Quermagnetisierung abnimmt. In der Realität fällt die Quermagnetisierung jedoch noch schneller ab, als theoretisch zu erwarten wäre. Dies liegt vor allem an lokalen Magnetfeldvariationen, die durch den menschlichen Körper oder technische Inhomogenitäten des Magneten verursacht werden. Diese Magnetfeldunterschiede beschleunigen noch einmal die Dephasierung der Spins. Die Zeitkonstante, die den tatsächlichen Verlauf der Querrelaxation beschreibt, ist  $T_2^*$ .

Mithilfe adäquater HF-Sequenzen kann der zeitliche Verlauf der Längs- bzw. Querrelaxation in den verschiedenen Regionen des Gehirns bestimmt und somit  $T_1$  und  $T_2^*$  ermittelt werden. Die Zeitkonstante  $T_1$  ist vorwiegend abhängig von den Eigenschaften des Gewebes und Sequenzen, die optimiert sind,  $T_1$  zu messen (sogenannte  *$T_1$ -gewichtete* Sequenzen), werden daher vor allem dazu verwendet, anatomische bzw. *strukturelle* Messungen des Gehirns vorzunehmen. Maßgeblich für die *funktionelle* MRT ist, dass die  $T_2^*$  nicht nur von den Eigenschaften des Gewebes, sondern auch vom *Oxygenierungsgrad* des Blutes, d.h. dem Verhältnis von *Oxyhämoglobin* (Hämoglobin, das Sauerstoff gebunden hat) zu *Desoxyhämoglobin* (Hämoglobin, das keinen Sauerstoff gebunden hat), abhängig ist. Blut mit einem hohen Oxygenierungsgrad hat, verglichen mit Blut mit geringerem Oxygenierungsgrad, eine längere Querrelaxationszeit  $T_2^*$  und deswegen länger ein stärkeres MR-Signal in  $T_2^*$ -

gewichteten Aufnahmen. Diesen Effekt bezeichnet man als *blood oxygen level dependency* oder *BOLD-Effekt*. Nach derzeitigem Verständnis entsteht der BOLD-Effekt durch die unterschiedlichen magnetischen Eigenschaften von Oxy- und Desoxyhämoglobin. Während das diamagnetische Oxyhämoglobin keinen speziellen magnetischen Effekt auf seine unmittelbare Umgebung hat, ist Desoxyhämoglobin paramagnetisch. Es führt zu Magnetfeld-Inhomogenitäten im umliegenden Gewebe und somit zu einer schnelleren Dephasierung der Spins, welche wiederum mit einer Verkürzung der Querrelaxationszeit  $T_2^*$  einhergeht.

Das Verhältnis von Oxy- und Desoxyhämoglobin in den Blutgefäßen des Gehirns ist abhängig vom Energieverbrauch der umliegenden Neurone. Neuronale Aktivität führt im Zuge eines verstärkten Energieverbrauchs der Neurone zu einer erhöhten Entnahme von Sauerstoff aus dem Blut. Hierdurch sinkt der Anteil von Oxyhämoglobin, was sich in einem kurzen Abfall des  $T_2^*$ -gewichteten MR-Signals widerspiegelt. In der Folge überkompensiert der regionale Blutfluss jedoch den Sauerstoffverbrauch mit einer Erhöhung des Anteils von Oxyhämoglobin. Dies wiederum führt zu einem lokalen Anstieg des MR-Signals. Dieses erhöhte Signal, das auch als *hämodynamische Antwort* bezeichnet wird, wird nun als Maß neuronaler Aktivität benutzt. Weiterführende Untersuchungen deuten jedoch darauf hin, dass das MR-Signal nicht direkt die Feuerrate der Neurone, sondern vielmehr die *lokalen Feldpotentiale* der Neurone und damit ihren synaptischen Input abbildet (Logothetis, Pauls, Augath, Trinath & Oeltermann, 2001; Logothetis & Wandell, 2004).

Der komplette Prozess der Überkompensation zeigt einen charakteristischen zeitlichen Verlauf, der auch als *hämodynamische Antwortfunktion* (*hemodynamic response function*; HRF) bezeichnet wird (Cohen et al., 1997; Friston, Frith, Turner & Frackowiak, 1995). Die typische HRF weist direkt nach der Stimulation für ca. 2 s einen kurzen Abfall des MR-Signals auf, dem sich ein Anstieg des Signals mit einem Maximum ca. 4 bis 6 s nach Beginn der Stimulation anschließt. Nach ca. 10 bis 12 s ist die Antwortfunktion wieder zum Ausgangsniveau zurückgekehrt und zeigt danach noch für einige Sekunden eine Unterschreitung des Ausgangsniveaus (*Undershoot*) bevor sich wieder ein Gleichgewicht zwischen Anteilen von Oxy- und Desoxyhämoglobin einstellt. Dieser charakteristische Verlauf trifft in vielen Fällen zu, gleichzeitig gibt es jedoch beträchtliche Variationen in Bezug auf die genaue Dauer und Form der Antwortfunktion in Abhängigkeit von der Hirnregion, der Stimulationsstärke und dem Individuum (Aguirre, Zarahn & D'Esposito, 1998; Handwerker, Ollinger & D'Esposito, 2004).

Die Signalveränderung aufgrund des BOLD-Effekts ist zwar prinzipiell messbar, beträgt jedoch gleichzeitig nur einen Bruchteil des gesamten MR-Signals zu einem Zeitpunkt. Um

das Signal-zu-Rausch-Verhältnis zugunsten des BOLD-Signals zu verbessern, werden in der fMRT-Forschung verschiedene Versuchsanordnungen und Auswertestrategien – meist in Kombination – verwendet. Ein erster Ansatz besteht darin, die Differenz zu einem MR-Bild der gleichen Region in einer Ruhephase oder in einer Bedingung, die der Experimentalbedingung bis auf den interessierenden kognitiven Prozess gleicht (*Baseline-Bedingung*), zu bilden. So können die zufälligen Signalfluktuationsen, die auf andere Faktoren als den BOLD-Effekt zurückzuführen sind, voneinander abgezogen werden, sodass nur noch das BOLD-Signal übrig bleibt. Daneben können unterschiedliche experimentelle Designs verwendet werden, um das Signal-zu-Rausch-Verhältnis im BOLD-Signal zu erhöhen. In *Block-Designs* werden die experimentellen Bedingungen blockweise dargeboten. Auf diese Weise entwickelt sich über den Block hinweg ein starkes MR-Signal. In *Event-Related-Designs* werden innerhalb eines Blocks unterschiedliche Bedingungen präsentiert, die jedoch durch längere Interstimulusintervalle voneinander getrennt werden. Im Event-Related-Design können die verschiedenen Bedingungen randomisiert vorgegeben werden, sodass Störeffekte wie Ermüdung o.Ä. ausgeschlossen werden können. Zudem erlaubt dieses Design eine bessere zeitliche „Abtastung“ der HRF. Gleichzeitig weisen Event-Related-Designs jedoch eine, verglichen mit dem Block-Design, geringe Messempfindlichkeit auf.

### Analyse

Bei der statistischen Analyse von fMRT-Daten wird, allgemein gesprochen, für jedes *Voxel*, d.h. für jedes Volumenelement innerhalb des Gehirns, ein vorhergesagter MR-Signalverlauf mit dem tatsächlich gemessenen Signalverlauf verglichen und geprüft, inwieweit der gemessene Signalverlauf durch das Modell vorhergesagt werden konnte. Hierzu wird meist das *Allgemeine Lineare Modell* (ALM; Friston, Holmes, et al., 1995) verwendet. Im ALM wird die für jedes Voxel  $j = 1, \dots, J$  zu jedem Messzeitpunkt  $i = 1, \dots, I$  beobachtete Zeitserie durch eine Linearkombination von Regressoren ( $x_{ik}$ ) und einen Fehlerterm ( $e_{ij}$ ) vorhergesagt (Kiebel & Holmes, 2004):

$$Y_{ij} = x_{i1}\beta_{i1} + x_{i2}\beta_{i2} + x_{i3}\beta_{i3} + \dots + x_{ik}\beta_{ik} + e_{ij} \quad (4)$$

Jeder Regressor steht hierbei für eine experimentelle Einflussvariable (z.B. eine experimentelle Bedingung), von der angenommen wird, dass sie den Verlauf des BOLD-Signals systematisch beeinflusst. Die Parameter  $\beta_{ij}$  sind die zu schätzenden Gewichte der Regressoren und geben an, wie stark der jeweilige Regressor zu den gemessenen Gesamtdaten beiträgt. Sie sollen so geschätzt werden, dass sie den Zeitverlauf des gemessenen MR-Signals, welches in Form einer Daten-Matrix mit einer Spalte pro Voxel und einer Zeile pro

Volumenmessung vorliegt, in jedem Voxel bestmöglich, d.h. mit möglichst geringer Abweichung vom beobachteten Zeitverlauf, vorhersagen.

Zur Schätzung der  $\beta$ -Gewichte wird zunächst eine sogenannte *Design-Matrix* spezifiziert. Diese Matrix besteht aus einer Spalte pro Regressor und einer Zeile pro Volumenmessung, und gibt an, wie sich die Werte der Regressoren über die Zeit verändern. Die Grundlage dieser Werte ist der genaue zeitliche Verlauf und die Abfolge der unterschiedlichen experimentellen Bedingungen, wie sie in der Untersuchung vorgegeben wurden. In seiner einfachsten Form wird im ALM angenommen, dass das fMRT-Signal in der Form eines Rechteckpulses verläuft, welcher sofort nach der Stimulation einsetzt und mit dem Ende der Stimulation endet. Durch eine „Faltung“ dieses Rechteckpulses mit dem typischen Verlauf der HRF (s.o.) wird jedoch ein realitätsnäheres Modell der einzelnen neuronalen Ereignisse geschaffen (Henson, 2004). Als Modell der HRF wird vielfach anstelle der typischen, empirisch ermittelten HRF die *kanonische HRF* (Friston et al., 1998) verwendet, die durch zwei Gamma-Funktionen charakterisiert ist. Hierbei modelliert eine der Gamma-Funktionen das Maximum der Funktion, während die zweite der Gamma-Funktionen den Undershoot der hämodynamischen Antwort modelliert. Nach der Spezifizierung der Design-Matrix werden für jedes Voxel die  $\beta$ -Gewichte der einzelnen Regressoren so geschätzt, dass die durch die Regressoren erklärte Varianz maximal und der Fehlerterm minimal wird. Hierfür wird typischerweise die Methode der kleinsten Quadrate verwendet. Es resultiert ein Satz von  $\beta$ -Gewichten, die angeben, wie groß der Einfluss des jeweils zugehörigen Regressors in dem jeweiligen Voxel ist.

Die  $\beta$ -Gewichte können nun verwendet werden, um die statistische Bedeutsamkeit der Regressoren innerhalb eines Voxels zu testen. Dies geschieht, indem im Rahmen eines *F*-Tests geprüft wird, ob der vorhergesagte Verlauf des Signals (die Regressoren) statistisch bedeutsam mit dem gemessenen Signal innerhalb eines spezifischen Voxels korreliert. Der resultierende multiple Korrelationskoeffizient gibt die (Partial-)Korrelation zwischen dem (vollen) Modell und dem beobachteten Zeitverlauf des MR-Signals an. Durch das Bilden von Kontrasten wird der statistische Vergleich auf die interessierenden Regressoren beschränkt. Hierfür werden die interessierenden Regressoren je nach geplantem Vergleich unterschiedlich gewichtet und mittels *t*-Tests verglichen. Die resultierenden Kontrastbilder geben an, in welchen Regionen ein bestimmter Regressor den Signalverlauf besser als ein anderer Regressor vorhersagt. Dies wird im Allgemeinen als aufgabenbezogene Aktivität interpretiert. Die bisher dargestellten Auswertungsschritte beschränken sich auf die Daten je eines Individuums. Mit ihnen lassen sich Regionen mit erhöhter Aktivierung innerhalb des Gehirns

einer Versuchsperson ermitteln (*First-Level-Analyse*). Um die eben beschriebenen statistischen Schlüsse über Versuchspersonen hinweg ziehen zu können, müssen die individuellen Ergebnisse auf Gruppenebene integriert werden. Dies geschieht im Rahmen der sogenannten *Second-Level-Analyse*. Hierzu werden Fixed-Effects-Analysen und Random-Effects-Analysen verwendet (Penny & Holmes, 2004). *Fixed-Effects-Analysen* berücksichtigen nur Innersubjekt-Varianzen. Ihre Ergebnisse gelten daher nur für die untersuchte Stichprobe. In *Random-Effects-Analysen* hingegen wird sowohl die Innersubjekt- als auch die Zwischensubjektvarianz berücksichtigt. Hier werden die Probanden als eine zufällige Auswahl aus der Gesamtpopulation betrachtet, sodass Rückschlüsse auf die Gesamtpopulation gezogen werden können (Friston, Holmes, Price, Büchel & Worsley, 1999). In fMRT-Experimenten und auch der vorliegenden Studie wird dies realisiert, indem die Innersubjekt-Varianz zunächst auf der Ebene der First-Level-Analyse individuell modelliert wird und die geschätzten individuellen Parameter dann einer Second-Level-Analyse zugeführt werden, in der die Zwischensubjekt-Varianz modelliert wird (Josephs & Henson, 1999).

Ein besonderes Problem der statistischen fMRT-Analyse liegt in der Festlegung der Signifikanzschwelle, ab welcher die Ergebnisse der fMRT-Datenauswertung berichtet werden sollen. Hier gilt es zu berücksichtigen, dass bei der in fMRT-Experimenten typischerweise gegebenen Anzahl von Voxeln die Wahrscheinlichkeiten für zufällig positive Ergebnisse extrem hoch ist. Die Ergebnisse der statistischen fMRT-Analyse müssen daher für multiple Vergleiche korrigiert werden. Hierzu wurden verschiedene Verfahren entwickelt, die sich vor allem im Hinblick darauf unterscheiden, wie sensitiv bzw. konservativ sie sind (z.B. Genovese, Lazar & Nichols, 2002; Worsley, 2007). Klassische Ansätze wie die Bonferroni-Korrektur für multiple Vergleiche sind vielfach dafür kritisiert worden, dass sie zu konservativ sind, um bedeutsame Aktivierungen zu erkennen und daher mit einem unkontrollierbar erhöhten  $\beta$ -Fehler einhergehen (Brett, Penny & Kiebel, 2004). Dies beruht teilweise darauf, dass diese Ansätze die räumliche Korrelation innerhalb der Daten nicht berücksichtigen. Eine Alternative, die auch für die vorliegende Arbeit verwendet wurde, besteht darin, eine Signifikanzschwelle für die einzelnen Voxel mit einer minimalen Clustergröße<sup>20</sup> so zu kombinieren, dass schlussendlich ein bestimmtes Gesamtsignifikanzniveau nicht überschritten wird. Die Bestimmung der minimalen Clustergröße kann mittels der AFNI-Routine AlphaSim (Ward, 2000) vorgenommen werden.

---

<sup>20</sup> Unter einem Cluster versteht man eine zusammenhängende Gruppe von Voxeln, deren Aktivierung eine willkürliche Schwelle überschreitet (Pieperhoff, Dickscheid & Amunts, 2013).

Die Schwellenbestimmung mit AlphaSim basiert auf der Annahme, dass bedeutsame Aktivierungen in fMRT-Daten räumlich gehäuft auftreten. Von falsch positiven Aktivierungen wird hingegen angenommen, dass sie sich räumlich zufällig innerhalb der Daten verteilen. Die Software bestimmt nun auf der Grundlage von Monte-Carlo-Simulationen mit einer Vielzahl von Iterationen, mit welcher Wahrscheinlichkeit Cluster unterschiedlicher Größe bei einer willkürlichen Signifikanzschwelle für die einzelnen Voxel zufällig auftreten. Auf der Grundlage der so generierten Wahrscheinlichkeitsverteilung kann nun die minimale Clustergröße bestimmt werden, ab der mit einer bestimmten Gesamtwahrscheinlichkeit davon ausgegangen werden kann, dass sie, gegeben die Signifikanzschwelle für die individuellen Voxel, nicht zufällig aufgetreten ist. Die genauen Clustergrößen können dabei bei mehrfachem Durchlaufen des Schätzvorganges variieren, da die Schätzungen auf Simulationen beruhen.

Das konkrete Vorgehen bei der Auswertung der hier erhobenen fMRT-Daten wird in 6.1.5 dargestellt. In 6.1.6 folgt die Formulierung der statistischen Hypothesen.

### **6.1.2 Versuchspersonen**

An der Untersuchung nahmen 35 rechtshändige Personen teil, die alle keine aktuellen oder früheren neurologischen bzw. psychiatrischen Erkrankungen oder Teilleistungsstörungen bzw. keine Aufmerksamkeitsdefizit-/Hyperaktivitätsstörung (ADHS) aufwiesen. Die Teilnehmer entstammten drei Altersgruppen: Siebenjährigen (entsprechend der Klassenstufe 1;  $n = 12$ , 6 männlich, mittleres Alter 7.4 Jahre, Spannweite 6.5-8.0 Jahre), Elfjährigen (Klassenstufe 5;  $n = 11$ , 6 männlich, mittleres Alter 11.5 Jahre, Spannweite 11.1-12.0 Jahre) und Erwachsenen ( $n = 12$ , 6 männlich, mittleres Alter 24.7 Jahre, Spannweite 21.4-34.1 Jahre). Zwölf zusätzliche Teilnehmer der jüngsten Altersgruppe wurden aus der Stichprobe ausgeschlossen, da sie entweder das Experiment nicht beendet hatten (drei Versuchspersonen) oder sich während der MRT-Messung zu stark bewegt hatten (acht Versuchspersonen, siehe 6.1.5 zu den Kriterien). Außerdem wurden zwei zusätzliche Teilnehmer aus der Altersgruppe der Elfjährigen wegen unvollständiger fMRT-Daten aus der weiteren Analyse ausgeschlossen. Die Erwachsenen wurden für ihre Teilnahme bezahlt. Die Kinder bekamen einen Geschenkgutschein und eine Teilnahmeurkunde, und ihre Eltern erhielten eine Aufwandsentschädigung für die Anreise. Die Studie war von der Ethikkommission des Fachbereichs Medizin der Goethe Universität Frankfurt genehmigt worden und alle Teilnehmer oder ihre Eltern erklärten sich schriftlich mit der Teilnahme einverstanden.

Vor der fMRT-Messung nahmen die Kinder und Erwachsenen an einer separaten Vortestung teil, bei der die Teilnahmevoraussetzungen überprüft wurden. Die Rechtshändigkeit wurde



mit dem *Edinburgh Handedness Inventory* (Oldfield, 1971) überprüft und ein korrigierter oder unkorrigierter Visus von mindestens 1.0 wurde mit einem Sehtest mit einer Landolt-Sehtafel (Schairer, Stuttgart) sichergestellt. Zum Screening von Verhaltensauffälligkeiten und psychischen Störungen wurde bei den Kindern der *Strengths and Difficulties Questionnaire* (SDQ; Goodman, 1997) und bei den Erwachsenen die *Symptom-Checkliste* (SCL-90-R; Franke, 2002) eingesetzt. Die Kinder wurden zusätzlich von ihren Eltern anhand der ADHS-Subskala des *Diagnostik-Systems für psychische Störungen bei Kindern und Jugendlichen* (DISYPS-KJ; Döpfner & Lehmkuhl, 2003) hinsichtlich des Vorhandenseins von ADHS-Symptomen eingeschätzt. Die Werte der Teilnehmer in den verschiedenen Tests wichen maximal eine Standardabweichung vom Mittelwert der Normstichprobe der jeweiligen Altersgruppe ab. Der IQ wurde bei den Kindern mit den *Ravens Standard Progressive Matrices* (SPM; Horn, 2009) und bei den Erwachsenen mit den *Standard Progressive Matrices-Plus* (SPM-Plus; Raven, Raven & Court, 2000) erhoben. Der mittlere Intelligenzquotient der Siebenjährigen betrug 108 ( $SD$ : 11.05), der Elfjährigen 101 ( $SD$ : 14.22) und der Erwachsenen 108 ( $SD$ : 11.65). Die IQ-Werte der verschiedenen Altersgruppen unterschieden sich nicht ( $F(2, 37) = 1.67, p = .20; \eta^2 = .08$ ).

### 6.1.3 Stimuli und Ablauf

Die komplette Untersuchung war für die Siebenjährigen auf drei Termine und für die beiden älteren Altersgruppen auf zwei Termine aufgeteilt (Tabelle 6.2).

Tabelle 6.2: Ablauf der Untersuchung.

Termin	Abschnitt	Dauer	Untersuchungsteil
1	1	60 min	Vorexperimentelle Verhaltenstestung
	2	20 min	Mock-Scanner-Training (Sieben- und Neunjährige)
2		30 min	Mock-Scanner-Training (Siebenjährige)
3	1	15 min	Instruktionen und Training für das Tracking-Experiment
	2	30 min	Funktionelle Messung/Tracking-Experiment
	3	6 min	Strukturelle Messung

Während des ersten Termins fand die vorexperimentelle Verhaltenstestung statt, und die Kinder wurden mittels eines Mock-Scanners, d.h. einer MRT-Scanner-Attrappe, mit der MRT-Umgebung und den damit verbundenen Geräuschen vertraut gemacht. Diese

Übungseinheit wurde für die Siebenjährigen an einem zweiten Termin, der ebenfalls vor der eigentlichen MRT-Messung lag, wiederholt. Während des dritten Termins fanden die funktionelle und die strukturelle MRT-Messung einschließlich vorausgehender Instruktion und Training statt.

Während der fMRT-Messung absolvierten die Versuchspersonen eine Object-Tracking-Aufgabe ähnlich der in Experiment 1 (Abbildung 6.1). Die Stimulusdarbietung wurde wie in Experiment 1 und 2 durch einen PC (Shuttle, Barebone SG31G2S, Intel Core 2 Duo, Windows XP; Grafikkarte NVIDIA GeForce 8400 GS) mit der Präsentationssoftware E-Prime 2.0 Professional (Psychology Software Tools, 2007) kontrolliert. Die Bildwiederholungsrate betrug 60 Hz. Die Bilder wurden mit einem LCD-Projektor (Sony, VPL-PX20) mit einer speziell angefertigten Linse auf eine matte Scheibe projiziert, die sich am Ende der Bohrung des MRT-Gerätes befand. Für die Versuchsperson war diese Scheibe über einen Spiegel sichtbar, der an der Kopfspule des MRT-Gerätes angebracht war.

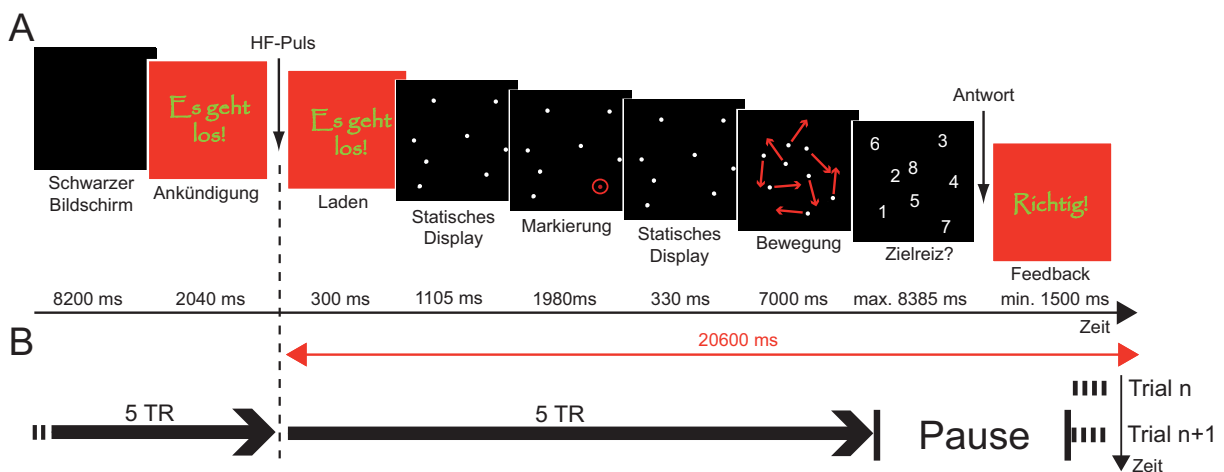


Abbildung 6.1: Object-Tracking-Aufgabe. (A) Ablauf eines Durchgangs. Zu Beginn des Durchgangs wurde 8.2 s ein schwarzer Bildschirm präsentiert. Dem folgte die Ankündigung der Stimuluspräsentation, die 2.34 s dargeboten wurde, bevor 1.105s ein Display mit acht statischen Punkten gezeigt wurde. Im Anschluss wurde einer der Punkte als Zielreiz markiert, indem er sechs Mal durch einen roten Kreis und ein Einfärben des Punktes hervorgehoben wurde. Nach einer weiteren Darbietung des statischen Displays für 330 ms bewegten sich die Punkte 7 s mit einer pseudozufälligen Bewegung. Nachdem die Punkte stehen geblieben waren, wurden sie durch Ziffern von 1 bis 8 ersetzt. Auf die Antwort des Probanden folgte ein Feedback-Display, das so lange präsentiert wurde, dass die Zeitspanne zwischen dem Laden der Trackingsequenz und dem Ausblenden des Feedback-Displays immer 20.6 s betrug. (B) Zeitliche Abstimmung der Stimuluspräsentation und der fMRT-Messung. Jeder Durchgang (Trial) stellte eine separate fMRT-Messung mit einer Dauer von 10 Wiederholungszeiten (TR, vgl. 6.1.4) = 25.6 s dar. Die Messung startete während der Feedbackphase des vorhergehenden Durchgangs (vgl. Trial n vs. Trial n + 1 in der Abbildung) und endete, während das Display, das die Probanden zur Antwort aufforderte, präsentiert wurde. Das Laden der Trackingsequenz wurde mit der sechsten TR synchronisiert.

Jeder Durchgang begann mit der 8.2 s andauernden Darbietung eines komplett schwarzen Bildschirms (RGB [0 0 0]). Dem folgte ein Display (2.34 s), auf dem mit den Worten „Es geht los!“ der Beginn der Stimulusdarbietung angekündigt wurde. Anschließend wurde für

1.105 s ein kleines schwarzes Display (Seitenlänge  $0.85^\circ$ , RGB [0 0 0]) mit acht statischen, fast weißen Punkten (Durchmesser  $1.42^\circ$ , RGB [200 200 200]) auf einem grauen Hintergrund (RGB [30 30 30]) dargeboten, der das Display komplett ausfüllte. In den folgenden 1.98 s wurde einer der Punkte als Zielreiz markiert, indem er sechs Mal für jeweils 165 ms rot eingefärbt und mit einem roten Kreis umrandet wurde. Nach weiteren 330 ms, in denen das statische Display gezeigt wurde, begannen sich die Punkte nach dem gleichen Muster und mit den gleichen Randbedingungen wie in Experiment 1 zu bewegen (vgl. 4.1.4). Wie in den beiden vorhergehenden Experimenten wurden in dieser Bewegungsphase die verschiedenen Abstandsbedingungen realisiert. Alle Versuchspersonen bekamen dieselben Bewegungssequenzen dargeboten, wobei, wie in 6.1.1 beschrieben, die kleinste Abstandsbedingung bei den Siebenjährigen entfiel.

Nach 7 s hielten die Punkte an und jeder der Punkte wurde durch eine Ziffer von 1 bis 8 (Höhe  $0.11^\circ$ , RGB [200 200 200]) ersetzt. Die Versuchspersonen sollten nun verbal die Ziffer angeben, die der Position des Zielreizes entsprach. Die Antwort wurde durch ein MRT-kompatibles Mikrofon, welches an den Kopfhörern, die zum Lärmschutz gegen die MRT-Geräusche verwendet wurden, befestigt war, in den MRT-Kontrollraum übertragen. Dort gab der Versuchsleiter die vom Probanden angegebene Ziffer in die Tastatur des Stimulus-Kontroll-PCs ein. Die Antworten der Probanden wurden zusätzlich aufgenommen und nach dem Experiment mit den vom Versuchsleiter eingetippten Antworten abgeglichen, um die Richtigkeit der Eingaben des Versuchsleiters sicherzustellen. Der Tastendruck des Versuchsleiters beendete die Darbietung des Ziffern-Displays und ein Feedback-Display wurde präsentiert. Hier wurden den beiden älteren Stichproben die Worte „Richtig!“ und „Falsch!“ dargeboten, und der jüngsten Altersgruppe wurde zusätzlich bei einer korrekten Antwort ein grünes Viereck und bei einer falschen Antwort ein rotes Viereck präsentiert. Das maximale Zeitintervall für eine Antwort betrug 8.385 s und die minimale Darbietung des Feedback-Displays betrug 1.5 s. Im Falle einer Antwort, für die weniger als 8.385 s benötigt wurden, wurde die Darbietungsdauer des Feedback-Displays verlängert, sodass die komplette Dauer des Zeitintervalls zwischen dem Laden des Tracking-Displays und dem Entfernen des Feedback-Displays 20.6 s betrug. Auf das Feedback-Display folgte der schwarze Bildschirm des nächsten Durchgangs.

Jeder Experimentaldurchgang wurde als separater fMRT-Run gemessen. Die fMRT-Datenmessung jedes Runs startete während der Feedbackphase des vorhergehenden Durchgangs. In den ersten Runs der Blöcke (denen kein Feedback vorausging) wurde im entsprechenden Zeitraum ein schwarzes Display dargeboten. Die fMRT-Messung endete

1.986 s nach der Präsentation des Antwort-Displays. Jeder funktionelle Run dauerte 25.6 s und wurde von einer 5.44 s langen Pause gefolgt. Die Durchgänge hatten somit eine feste Länge von 31.04 s. Die einzelnen Durchgänge wurden als separate Runs gemessen, da so zwischen den Durchgängen Messpausen entstanden, in denen das MRT-Gerät vollständig still war. Hierdurch wurden die Antworten der Probanden hörbar und Bewegungsartefakte, die typischerweise mit verbalen Antworten einhergehen, konnten vermieden werden, da die verbalen Antworten außerhalb der Messungen lagen. Die Versuchsteilnehmer waren instruiert, mit ihrer Antwort bis zum Ende der fMRT-Datenmessung des jeweiligen Durchgangs zu warten, damit ihre Antwort gehört werden konnte. Die zeitliche Synchronisation von fMRT-Datenerhebung und Reizdarbietung wurde sichergestellt, indem das Laden des Tracking-Displays mit der sechsten TR gekoppelt wurde. Abbildung 6.1 illustriert die Abstimmung von Messung und Stimuluspräsentation.

Die elfjährigen Kinder und die Erwachsenen durchliefen 60 Experimentaldurchgänge, d.h. 12 Durchgänge pro Abstandsbedingung (2.8, 5.6, 8.4 und 11.2 Winkelminuten) und 12 Baseline-Durchgänge. Die Siebenjährigen, bei denen die kleinste Abstandsbedingung entfiel, absolvierten 48 Durchgänge. Die Durchgänge der beiden älteren Altersgruppen wurden in vier Blöcken mit je 15 Durchgängen (Dauer eines Blocks: 7:45 min), die Durchgänge der Siebenjährigen in sechs Blöcken mit jeweils acht Durchgängen (Dauer pro Block: 4:08 min) präsentiert. Jeder Block der beiden älteren Altersgruppen enthielt drei Durchgänge pro Bedingung und jeder Block der Siebenjährigen zwei Durchgänge pro Bedingung. Die Abfolge der Durchgänge innerhalb der Blöcke war pseudorandomisiert mit der Randbedingung, dass die gleiche Bedingung nicht zweimal direkt aufeinanderfolgen durfte. Die Reihenfolge der Durchgänge innerhalb der Blöcke war für alle Versuchspersonen dieselbe, die Reihenfolge der Blöcke wurde jedoch über die Versuchspersonen hinweg randomisiert. Nach jedem Block hatten die Versuchspersonen die Möglichkeit, eine Pause zu machen, deren Länge sie selbst bestimmen konnten. Die siebenjährigen Kinder wurden nach der Hälfte des Experiments aus dem MRT-Gerät geholt, sodass sie die Gelegenheit hatten, sich zu bewegen. Der funktionellen Messung schloss sich die strukturelle Messung mit einer Dauer von ca. 6 min an. Die gesamte Messung (die Pausen aus- und die strukturelle Messung eingeschlossen) dauerte ca. 36 min für die beiden älteren Altersgruppen und ca. 30 min für die Siebenjährigen. Wie auch in den vorhergehenden Experimenten war die Aufgabe zur Steigerung der Motivation der Kinder in ein mittelalterliches Szenario eingebettet. Die Rahmengeschichte war hierbei identisch mit der aus Experiment 1. Auch bekamen die Versuchspersonen vor jeder Pause eine „Schatzkammer“ mit dem Zwischenstand dargeboten und am Ende des

Experiments wurde die Schatzkammer zum Anzeigen des Endstandes präsentiert. Die Einführung in die Geschichte fand in schriftlicher Form auf einem Laptop außerhalb des MRT-Scanner-Raumes statt, wobei der Text den Siebenjährigen vorgelesen wurde. In die Einführung war wieder ein Training der Aufgabe integriert. Hierzu wurden im ersten Schritt zwei Durchgänge mit um das Sechsfache vergrößerten Stimuli (vgl. 4.1.5) und im zweiten Schritt fünf Durchgänge mit denselben Stimulusgrößen wie im eigentlichen Experiment dargeboten. Bei Bedarf konnten die fünf Übungsdurchgänge in Originalgröße für die Siebenjährigen wiederholt werden. Innerhalb des MRT-Gerätes absolvierten die Versuchspersonen vier weitere Übungsdurchgänge.

#### 6.1.4 fMRT-Datengewinnung

Die Probanden waren instruiert, während der Datengewinnung so ruhig wie möglich zu liegen, und ihre Kopfbewegungen wurden zusätzlich mit Polstern eingeschränkt. Mit Ohrstöpseln und Kopfhörern wurden die Geräusche des MRT-Gerätes gedämpft. Die Daten wurden mit einem 3 Tesla MRT-Scanner (Magnetom Allegra, Siemens, Erlangen) erhoben, der mit einer Einkanalspule ausgestattet war. Die funktionellen Daten wurden mit einer  $T_2^*$ -gewichteten *Echo Planar Imaging* (EPI)-Sequenz (Wiederholungszeit (*repetition time*; TR) = 2560 ms, Echozeit (*echo time*; TE) = 30 ms) mit 32 Schichten (Voxelgröße =  $3 \times 3 \times 3 \text{ mm}^3$ , Gap = 1 mm, Sichtfeld (*field of view*; FoV) =  $192 \times 192 \text{ mm}^2$ , Matrixgröße  $64 \times 64$ , Kippwinkel (*flip angle*; FA) =  $90^\circ$ ) gewonnen. Die Schichten waren um  $30^\circ$  von axial nach coronal geneigt, um den durch magnetische Suszeptibilität induzierten Signalverlust zu reduzieren (Deichmann, Gottfried, Hutton & Turner, 2003). Die Parameter der EPI-Sequenz wurden so gewählt, dass die Lautstärke der MRT-Geräusche, speziell für die Kinderstichproben, niedrig gehalten werden konnte (Bandbreite 1860 Hz/Pixel, Echo Spacing 740  $\mu\text{s}$ ). Bei dem Experiment handelte es sich um ein Block-Design-Experiment (vgl. 6.1.1), bei dem die Struktur der Sequenzen so angelegt wurde, dass ein Run aus N aufeinanderfolgenden EPI-Volumen und einer Pause T bestand, wobei für die vorliegende Untersuchung N = 10 (resultierend in einer Gesamtmesszeit von 25.6 s pro Run; siehe auch 6.1.3) und T = 5.44 s (siehe oben) gewählt wurde. Die strukturellen Daten wurden mit einer  $T_1$ -gewichteten *Magnetization Prepared Rapid Gradient Echo* (MP-RAGE)-Sequenz (TR = 1700 ms, TE = 1.44 ms, Voxelgröße  $1 \times 1 \times 1 \text{ mm}^3$ , FoV =  $256 \times 256 \times 160 \text{ mm}^3$ , Matrixgröße  $256 \times 256 \times 160$ , FA =  $7^\circ$ ) erhoben.

#### 6.1.5 fMRT-Datenauswertung

Die MRT-Daten wurden mit SPM8 (Wellcome Trust Center for Neuroimaging, 2009) vorverarbeitet und analysiert.

### ***Vorverarbeitung***

Im Rahmen der Vorverarbeitung der funktionellen Bilder wurden in einem ersten Schritt die ersten zwei Volumen jedes Runs aus der Analyse ausgeschlossen, um eine stabile Magnetisierung innerhalb der Messreihe sicherzustellen. Anschließend wurde eine Bewegungskorrektur (*realignment*) durchgeführt, indem jedes Einzelbild der EPI-Zeitserie auf das erste Bild der Serie reorientiert wurde (Friston, Williams, Howard, Frackowiak & Turner, 1996; Jenkinson, Bannister, Brady & Smith, 2002). Danach wurden die funktionellen MRT-Bilder mit einem Gauß-Filter von 4 mm Full Width at Half Maximum (FWHM) räumlich geglättet, um den Datensatz für die Bearbeitung mit der ArtRepair-Toolbox (Mazaika, 2009a) vorzubereiten. Diese Toolbox wird verwendet, um Datensätze mit starken Bewegungsartefakten zu bereinigen, wie sie bei Messungen mit Kindern häufig auftreten. Die aus der Bewegungskorrektur resultierenden Bewegungsparameter wurden in die Toolbox eingespeist und in einem ersten Schritt wurden Interpolationsfehler der EPI-Zeitserie, die durch die Bewegungskorrektur entstanden waren, korrigiert (Grootoonk et al., 2000). Dieser Verarbeitungsschritt wird als Alternative zu Bewegungsregressoren in der Design-Matrix angesehen (Mazaika, 2009b). In einem zweiten Schritt wurde ArtRepair verwendet, um artefaktbehaftete Volumen zu identifizieren. ArtRepair leistet dies durch die Detektion großer Bewegungen zwischen zwei Volumenmessungen (Schwelle: 1.5 mm) und das Erkennen starker Signalfluktuationen. Die identifizierten Volumen wurden anschließend korrigiert, indem zwischen den beiden nächsten nicht korrigierten Volumenmessungen interpoliert wurde. Durchgänge mit mehr als zwei interpolierten Volumen und Probanden mit mehr als 15 % korrigierten Durchgängen wurden von der weiteren Analyse ausgeschlossen (zur Anzahl ausgeschlossener Probanden siehe 6.1.2). Anschließend wurden die funktionellen Daten – anhand der aus der Segmentierung der individuellen strukturellen Daten resultierenden Normalisierungsparameter – auf den Standardraum (MNI 152) normalisiert und noch einmal räumlich geglättet (7 mm FWHM), sodass insgesamt eine räumliche Glättung von 8 mm FWHM resultierte.

### ***Inferenzstatistische Analyse***

Im Rahmen der First-Level-Analyse wurde zunächst für jeden Probanden ein ALM (Friston, Holmes, et al., 1995) spezifiziert. In diesem Modell stellte jeder Run eine Session dar und war durch einen separaten Regressor modelliert. Jeder Regressor repräsentierte die Trackingphase des jeweiligen Durchgangs in Form eines Rechtecksignals, welches mit dem Laden des Tracking-Displays einsetzte und mit dem Ende der fMRT-Datenmessung endete (siehe 6.1.3 und Abbildung 6.1). Für die Modellschätzung wurde dieses Rechtecksignal mit der

kanonischen HRF (vgl. 6.1.1) gefaltet. Zusätzlich wurde ein zeitlicher Hochpass-Filter mit einer Grenzfrequenz von 128 s auf die Daten angewendet (Friston et al., 1998). Die individuellen Kontrastbilder wurden berechnet, indem die zu einer Abstandsbedingung gehörenden Parameterschätzer aller Runs dieser Person mit den Parameterschätzern aller Runs einer anderen Abstandsbedingung bzw. mit Null kontrastiert wurden. Die Durchgänge einer Bedingung wurden hierdurch zusammengefasst und konnten mit den Durchgängen einer anderen Bedingung verglichen werden. Um Aktivierungen, die mit dem Verfolgen von Objekten in Verbindung stehen, abzubilden, wurde die Aktivierung in der größten Abstandsbedingung (11.2 Winkelminuten) mit Null kontrastiert. Ursprünglich war hier ein Kontrast mit der Baseline-Bedingung geplant. Da sich jedoch herausstellte, dass die in der Baseline-Bedingung dargebotene Stimuluskonfiguration entgegen der ursprünglichen Absicht nicht erfolgreich darin war, neuronale Aktivität, die mit dem Verfolgen von Objekten in Verbindung gebracht wird, zu unterdrücken, wurde diese Bedingung nicht weiter in die Datenauswertung mit einbezogen. Aktivierungen, die mit einer erhöhten räumlichen Präzision während des Verfolgens von Objekten, also mit einem Zusammenziehen des Fokus der Aufmerksamkeit, einhergehen, wurden abgebildet, indem jeweils zwei unterschiedliche Abstandsbedingungen kontrastiert wurden. Für jede Altersgruppe wurden unterschiedliche Paare von Abstandsbedingungen kontrastiert. Der Auswahl der beiden Abstandsbedingungen für jede Altersgruppe lagen drei Kriterien zugrunde, die sich an der Performanz der verschiedenen Altersgruppen in der Tracking-Aufgabe orientierten. Das erste Kriterium für die Auswahl bestand darin, dass die zwei zu vergleichenden Bedingungen möglichst starke Leistungsunterschiede aufweisen sollten, um einen tatsächlichen Unterschied in der Aufgabenschwierigkeit sicherzustellen. Zweitens sollte auch die einfachere Abstandsbedingung noch keine optimale Leistung aufweisen, um sicherzustellen, dass auch in dieser Bedingung Anstrengung nötig war, um die Aufgabe zu erfüllen. Drittens sollte der Leistungsunterschied, den die Altersgruppen in den jeweils zwei Bedingungen zeigten, zwischen den verschiedenen Altersgruppen vergleichbar sein. Die Bedingungen, die diese Kriterien erfüllten, konnten erst nach der Auswertung der Verhaltensdaten bestimmt werden und werden daher im Ergebnisteil weiter spezifiziert.

Die aus den Vergleichen resultierenden Kontrastbilder der einzelnen Versuchspersonen wurden anschließend in Random-Effects-Gruppenanalysen (Holmes & Friston, 1998; vgl. 6.1.1) gespeist. Um die statistische Bedeutsamkeit eines Kontrastes über alle Probanden hinweg zu ermitteln, wurden *t*-Tests berechnet und um Altersgruppen zu vergleichen, wurden vollfaktorielle ANOVAs berechnet. Post-hoc *t*-tests (mit Bonferroni-Korrektur für multiple

Vergleiche) wurden verwendet, um signifikante Haupteffekte der ANOVAs weiter zu untersuchen. Die Bonferroni-korrigierten  $\alpha$ -Niveaus der  $t$ -Tests werden im Kontext der jeweiligen Analyse angegeben. In die Gruppenanalysen wurden, soweit im Ergebnisteil für die entsprechende Analyse angegeben, die individuellen Leistungswerte als Störvariable (*covariate of no interest*) in die Berechnungen aufgenommen. Dieses Vorgehen versucht dem allgemeinen Problem der neurokognitiven Entwicklungspsychologie zu begegnen, dass Aktivierungsunterschiede zwischen Altersgruppen oft von Unterschieden in der Aufgabenperformanz begleitet werden. Dies hinterlässt eine Unsicherheit, ob Unterschiede in der neuronalen Aktivierung der Gruppenzugehörigkeit, dem Leistungsniveau oder beidem zuzuschreiben sind (Church, Petersen & Schlaggar, 2010). Die Berücksichtigung von Leistungsunterschieden ist daher eine wichtige Voraussetzung, um Alterseffekte eindeutig isolieren zu können.

Im Ergebnisteil werden Aktivierungen berichtet, wenn sie ein  $\alpha$ -Niveau von 5 % erreichen. Zur Korrektur für multiple Vergleiche (vgl. 6.1.1) wurde für alle Gruppenanalysen ein (unkorrigierter) voxelbasierter  $p$ -Wert von .001 mit einer durch AlphaSim (Ward, 2000; 10000 Resamplings) ermittelten Clusterschwelle von  $k = 47$  kombiniert.

Um die Entwicklungsverläufe von Aktivierungen in Regionen mit signifikanten Altersgruppenunterschieden detailliert charakterisieren zu können, wurden Sphären mit 6 mm Radius um die Voxel mit der höchsten Aktivierung (*peak voxel*) innerhalb von Clustern mit Alterseffekten gelegt und die mittleren  $\beta$ -Werte aller Voxel innerhalb der Sphäre berechnet.

### 6.1.6 Statistische Hypothesen

Im Anschluss an die Beschreibung der geplanten methodischen Vorgehensweise kann nun eine Übersetzung der in Kapitel 3 vorgestellten psychologischen Hypothesen in statistische Hypothesen vorgenommen werden.

#### *Hypothesen zur Aufgabenperformanz*

##### *Hypothese 6*

Hypothese 6 besagt, dass Kinder bei großen Zielreiz-Distraktor-Abständen in der Lage sind, so gut wie Erwachsene ein Objekt mit Aufmerksamkeit zu verfolgen. Als statistischer Kennwert der Trackingleistung wurde der Anteil korrekter Antworten pro Abstandsbedingung eingeführt. Als Bedingung mit großem Zielreiz-Distraktor-Abstand soll die in der vorliegenden Untersuchung größte realisierte Abstandsbedingung (11.2 Winkelminuten) herangezogen werden. Die entsprechende statistische Hypothese lautet nun:



**H6:** Die mittlere Trackingleistung der verschiedenen Altersgruppen in der Abstandsbedingung 11.2 Winkelminuten unterscheidet sich nicht voneinander.

Diese Hypothese soll geprüft werden, indem die gemittelten Genauigkeitswerte aller Altersgruppen in der Abstandsbedingung 11.2 Winkelminuten untereinander verglichen werden. Es werden somit drei geplante Vergleiche durchgeführt. Hieraus ergibt sich ein korrigiertes  $\alpha$ -Niveau von 1.67 % pro Vergleich. Damit die Hypothese als zutreffend angesehen werden kann, müssen alle Teilhypothesen zutreffen. Es wird somit ein strenges Entscheidungskriterium zugrunde gelegt (vgl. Hager et al., 2001).

#### *Hypothese 7*

Gemäß Hypothese 7 steigt, über alle Zielreiz-Distraktor-Abstände hinweg betrachtet, die Leistung in der Object-Tracking-Aufgabe mit zunehmendem Alter an. Die Trackingleistung einer Altersgruppe über alle Abstandsbedingungen hinweg entspricht dem über alle Versuchspersonen einer Altersgruppe und die von ihnen absolvierten Abstandsbedingungen hinweg gemittelten Anteil der korrekten Antworten. Wie in 6.1.1 dargestellt, wurde der kleinste Zielreiz-Distraktor-Abstand in der jüngsten Altersgruppe nicht dargeboten. Zur vollständigen Überprüfung von Hypothese 7 muss diese daher in zwei Teilhypothesen aufgeteilt werden, in die jeweils leicht abweichende Daten eingehen. Eine Mittelung der Trackingleistung über *alle hier realisierten Abstandsbedingungen* (d.h. 2.8, 5.6, 8.4 und 11.2 Winkelminuten) ist nur bei den Elfjährigen und den Erwachsenen möglich. Es resultiert:

**H7a:** Die Trackingleistung, gemittelt über die Abstandsbedingungen 2.8, 5.6, 8.4 und 11.2 Winkelminuten, ist bei den Elfjährigen niedriger als bei den Erwachsenen.

Von *allen Altersgruppen* wurden die Abstandsbedingungen 5.6, 8.4 und 11.2 Winkelminuten absolviert. Es resultiert:

**H7b:** Die Trackingleistung, gemittelt über die Abstandsbedingungen 5.6, 8.4 und 11.2 Winkelminuten, steigt mit zunehmendem Alter an.

Hypothese H7a soll geprüft werden, indem die Trackingleistung der Elfjährigen mit der der Erwachsenen verglichen wird. Hypothese H7b wird geprüft, indem die Trackingleistung der jeweils benachbarten Altersgruppen miteinander verglichen werden. Es werden somit drei geplante Vergleiche durchgeführt. Hieraus ergibt sich ein korrigiertes  $\alpha$ -Niveau von 1.67 % pro Vergleich. Für das Zutreffen von H7 müssen alle Teilhypothesen zutreffen. Es wird somit ein strenges Entscheidungskriterium zugrunde gelegt (vgl. Hager et al., 2001).

### ***Hypothesen zur aufgabenbezogenen neuronalen Aktivierung***

#### *Hypothese 8*

Hypothese 8 besagt, dass sich über alle Altersgruppen hinweg beim Verfolgen von Objekten eine erhöhte neuronale Aktivität im Tracking-Netzwerk aus FEF, PCC und MT zeigt. Als Maß für die neuronale Aktivität wurde die BOLD eingeführt (vgl. 6.1.1). Das Verfolgen von Objekten wurde als der Kontrast der leichtesten Abstandsbedingung (11.2 Winkelminuten) gegen Null definiert (vgl. 6.1.5). Die entsprechende statistische Hypothese lautet:

**H8:** Die aufgabenbezogene BOLD-Signalveränderung weicht bei einem Zielreiz-Distraktor-Abstand von 11.2 Winkelminuten über alle Altersgruppen hinweg in den FEF, dem PPC und MT signifikant von Null ab.

#### *Hypothese 9*

Hypothese 9 besagt, dass die Kinder die Komponenten des Tracking-Netzwerkes umso schwächer aktivieren, je jünger sie sind. Die entsprechende statistische Hypothese lautet:

**H9:** Die Höhe der mit dem Kontrast ( $11.2 > 0$ ) verbundenen BOLD-Signalveränderung in den FEF, dem PPC und MT steigt mit zunehmendem Alter an.

#### *Hypothese 10*

Gemäß Hypothese 10 zeigt sich über alle Altersgruppen hinweg bei erhöhten Anforderungen an die Präzision der Selektion ein Anstieg der neuronalen Aktivität in den FEF. Der Anstieg der Anforderungen wurde in 6.1.5 als Kontrast zwischen zwei verschiedenen Zielreiz-Distraktor-Abstandsbedingungen – einer größeren und einer kleineren Abstandsbedingung – definiert, wobei die konkreten Abstandsbedingungen, die für eine bestimmte Altersgruppe verwendet wurden, anhand der in 6.2.1 ermittelten Verhaltensdaten ausgewählt werden. Die statistische Hypothese lautet:

**H10:** Die BOLD-Signalveränderung, die mit dem Kontrast (schwere Abstandsbedingung  $>$  leichte Abstandsbedingung) einhergeht, erweist sich über alle Altersgruppen hinweg in den FEF als statistisch bedeutsam.

#### *Hypothese 11*

Gemäß Hypothese 11 ist der Anstieg der neuronalen Aktivität in den FEF umso größer, je älter die Probanden sind. Es resultiert:

**H11:** Die mit dem Kontrast (schwere Abstandsbedingung  $>$  leichte Abstandsbedingung) einhergehende BOLD-Signalveränderung in den FEF ist umso größer, je älter die Probanden sind.

## 6.2 Ergebnisse

Im Folgenden werden zunächst die Ergebnisse auf Verhaltensebene (6.2.1), dann die fMRT-Ergebnisse dargestellt (6.2.2).

### 6.2.1 Verhaltensdaten

Abbildung 6.2 zeigt, dass die Performanz in der Object-Tracking-Aufgabe mit zunehmendem Alter und zunehmendem Zielreiz-Distraktor-Abstand anstieg. Die statistische Bedeutsamkeit dieser Beobachtungen wurde von beiden durchgeführten ANOVAs (vgl. 6.1.1) bestätigt. In der ersten ANOVA, der zweifaktoriellen ANOVA mit Messwiederholung mit dem Zwischensubjektfaktor Altersgruppe (7 Jahre, 11 Jahre vs. Erwachsene) und dem Messwiederholungsfaktor Abstand (5.6, 8.4 vs. 11.2 Winkelminuten), zeigte ein signifikanter Haupteffekt des Faktors Altersgruppe ( $F(2, 32) = 95.85, p < .0001, \eta^2 = .86$ ), dass die Leistung mit zunehmendem Alter anstieg. Geplante Vergleiche ( $t$ -Tests für unabhängige Stichproben;  $\alpha$ -Niveau von 5 % Bonferroni-korrigiert für 3 Vergleiche: 1.67 %; vgl. 6.1.6) zeigten, dass es signifikante Verbesserungen sowohl zwischen 7 und 11 Jahren ( $t(21) = 9.08, p < .0001, r_{\text{äquivalent}} = .90$ ) als auch zwischen 11 Jahren und dem Erwachsenenalter ( $t(21) = 2.62, p < .025; r_{\text{äquivalent}} = .49$ ) gab. Die Siebenjährigen erreichten auch in der leichtesten Abstandsbedingung (11.2 Winkelminuten) nicht die Leistung der Elfjährigen ( $t(21) = 4.23, p < .0001, r_{\text{äquivalent}} = .68$ ) oder der Erwachsenen ( $t(22) = 4.44, p < .0001, r_{\text{äquivalent}} = .69$ ), wobei sich letztere nicht unterschieden ( $t(21) = 0.32; p = .73, r_{\text{äquivalent}} = .07$ ;  $\alpha$ -Niveau von 5 % Bonferroni-korrigiert für 3 Vergleiche: 1.67 %; vgl. 6.1.6). Außerdem zeigte sich ein signifikanter Haupteffekt des Faktors Abstand ( $F(2, 64) = 49.44, p < .0001, \eta^2 = .61$ ), der eine zunehmende Leistung von 5.6 nach 8.4 Winkelminuten ( $t(34) = 5.45, p < .0001, r_{\text{äquivalent}} = .68$ ) und von 8.4 nach 11.2 Winkelminuten ( $t(34) = 2.53, p < .025, r_{\text{äquivalent}} = .40$ ) widerspiegelt ( $\alpha$ -Niveau von 5 % Bonferroni-korrigiert für 2 Vergleiche: 2.5 %). Die signifikante Interaktion der Faktoren Altersgruppe und Abstand ( $F(4,64) = 18.21, p < .0001, \eta^2 = .53$ ) zeigt, dass sich die Leistung der verschiedenen Altersgruppen mit zunehmendem Zielreiz-Distraktor-Abstand unterschiedlich verbesserte. Während sich die Siebenjährigen sowohl von 5.6 zu 8.4 ( $t(11) = 8.75, p < .0001, r_{\text{äquivalent}} = .94$ ) als auch tendenziell von 8.4 zu 11.2 Winkelminuten ( $t(11) = 2.57; p = .026, r_{\text{äquivalent}} = .61$ ) verbesserten, wiesen die Leistungen der Elfjährigen und der Erwachsenen keine Unterschiede in diesen beiden Vergleichen auf (alle  $p > 0.83$ ;  $\alpha$ -Niveau von 5 % Bonferroni-korrigiert für 6 Vergleiche: 0.83 %).

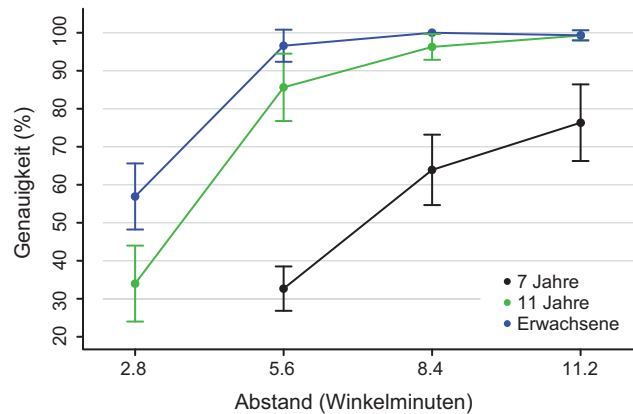


Abbildung 6.2: Ergebnisse der Object-Tracking-Aufgabe. Mittlere Genauigkeit der verschiedenen Altersgruppen in Abhängigkeit vom Zielreiz-Distraktor-Abstand. Die schwerste Bedingung (2.8 Winkelminuten) wurde bei den Siebenjährigen nicht erhoben. Die Fehlerbalken stellen die 95 %-Konfidenzintervalle (unkorrigiert) dar.

Die zweite ANOVA, eine ebenfalls zweifaktorielle ANOVA mit Messwiederholung mit den Zwischensubjektfaktoren Altersgruppe (Elfjährige vs. Erwachsene) und dem Messwiederholungsfaktor Abstand (2.8, 5.6., 8.4 vs. 11.2), bestätigte die bessere Leistung der Erwachsenen im Vergleich zu den Elfjährigen ( $F(1, 21) = 12.91, p < .005, \eta^2 = .38$ ) und die zunehmende Leistung mit zunehmendem Abstand ( $F(3, 63) = 173.18, p < .0001, \eta^2 = .89$ ). Post-hoc  $t$ -Tests für abhängige Stichproben ( $\alpha$ -Niveau von 5 % Bonferroni-korrigiert für 3 Vergleiche: 1.67 %) zeigten für den Haupteffekt Abstand eine Leistungsverbesserung von 2.8 zu 5.6 Winkelminuten ( $t(22) = 13.37, p < .0001, r_{\text{äquivalent}} = .94$ ) und von 5.6 zu 8.4 Winkelminuten ( $t(22) = 2.89, p < .01, r_{\text{äquivalent}} = .53$ ), aber nicht zwischen 8.4 und 11.2 Winkelminuten ( $t(22) = 1.79, p = .10, r_{\text{äquivalent}} = .36$ ). Beide Altersgruppen erreichten somit bereits bei einem Zielreiz-Distraktor-Abstand von 8.4 Winkelminuten optimale Performanz. Die signifikante Interaktion der Faktoren Altersgruppe und Abstand ( $F(3, 63) = 6.66, p < .01, \eta^2 = .24$ ) ist darauf zurückzuführen, dass die Elfjährigen und die Erwachsenen sich in der schwierigsten Abstandsbedingung, nicht jedoch in den anderen Abstandsbedingungen unterschieden (2.8 Winkelminuten:  $t(21) = 3.40, p < .0125, r_{\text{äquivalent}} = .59$ ; alle anderen  $p > .0125$ ;  $\alpha$ -Niveau von 5 % Bonferroni-korrigiert für 4 Vergleiche: 1.25 %).

Gemäß der inferenzstatistischen Auswertung der Verhaltensdaten muss die statistische Hypothese H6 als nicht zutreffend betrachtet werden: Die Siebenjährigen zeigten in der Abstandsbedingung 11.2 Winkelminuten eine Leistung, die signifikant unter der Leistung der beiden anderen Altersgruppen liegt. Die statistische Hypothese H7, die über alle Abstandsbedingungen hinweg eine steigende Leistung mit zunehmendem Alter vorhersagte, kann hingegen als bestätigt betrachtet werden. Sowohl in der ANOVA mit zwei als auch mit drei Altersgruppen stieg die aggregierte Leistung der verschiedenen Altersgruppen mit

zunehmendem Alter an. Die Leistungsunterschiede wurden in der Auswertung der fMRT-Daten berücksichtigt, indem die individuellen Leistungen der Versuchspersonen als Störvariablen mit in die Analyse aufgenommen wurden.

### 6.2.2 FMRT-Daten

#### *Altersunabhängige Aktivierungen beim Verfolgen von Objekten*

Das Verfolgen von Objekten aktivierte ein bilaterales fronto-parietales Netzwerk aus SPL, AIPS, PIPS, FEF und dem Bewegungsareal MT (siehe Abbildung 6.3 und Tabelle 6.3). Zusätzlich wurden die rechte anteriore Insula und subkortikale Areale (darunter Putamen und Claustrum) und das Cerebellum während des Verfolgens sich bewegender Objekte aktiviert. Die statistische Hypothese H8, gemäß der sich über die Altersgruppen hinweg signifikante aufgabenbezogene Aktivierungen in den FEF, PPC und MT zeigen, kann also als bestätigt betrachtet werden.

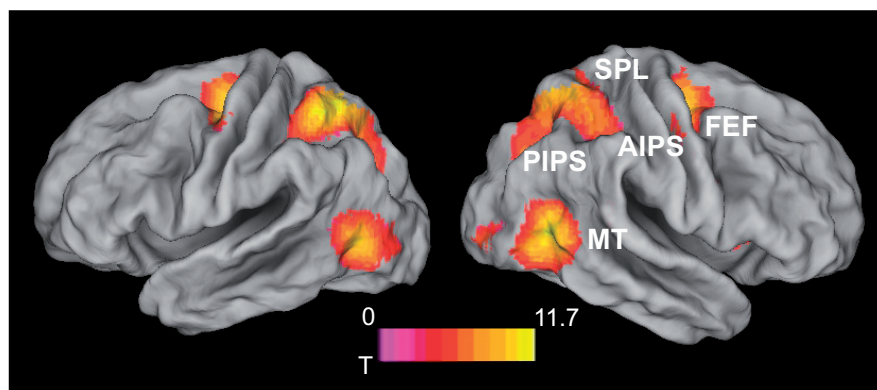


Abbildung 6.3: Altersunabhängige neuronale Aktivierung während des Verfolgens von Objekten (11.2 Winkelminuten > Null). Aktivierungen werden ab einer statistischen Schwelle von  $p < .05$  (korrigiert für multiple Vergleiche, siehe 6.1.1) dargestellt. Siehe Tabelle 6.3 für weitere Details. AIPS, anteriorer intraparietaler Sulcus; FEF, frontale Augenfelder; MT, Bewegungsareal MT/V5; PIPS, posteriorer intraparietaler Sulcus; SPL, superiorer parietaler Lobus.

Tabelle 6.3: Altersunabhängige neuronale Aktivierung während des Verfolgens von Objekten (11.2 Winkelminuten > Null;  $t$ -Statistik).

Anatomische Region	Hem	BA	$k$	$T_{max}$	MNI-Koordinaten		
					x	y	z
Anteriore Insula, inferiorer frontaler Gyrus, Putamen, Claustrum	R	13	314	7.05	38	16	8
Präzentraler Gyrus, superiorer frontaler Gyrus, medialer superiorer frontaler Gyrus, mittlerer frontaler Gyrus	R	6/24/32	1347	10.47	24	-10	50
Präzentraler Gyrus, superiorer frontaler Gyrus, medialer superiorer frontaler Gyrus, supplementär-motorisches Areal, mittlerer frontaler Gyrus	L	24	1152	10.66	-28	-12	48
Präzentraler Gyrus, inferiorer frontaler Gyrus	R	6/9	127	5.00	52	2	32
Superiorer parietaler Lobus, anteriorer intraparietaler Sulcus, inferiorer parietaler Lobus, postzentraler Gyrus, Precuneus, posteriorer intraparietaler Sulcus, mittlerer temporaler Gyrus, mittlerer okzipitaler Gyrus	L	5/7/19/ 37/39/40	3447	13.80	-20	-56	56
Mittlerer temporaler Gyrus, inferiorer temporaler Gyrus, mittlerer okzipitaler Gyrus, posteriorer intraparietaler Sulcus, Precuneus, inferiorer parietaler Lobus, superiorer parietaler Lobus, anteriorer intraparietaler Sulcus, parazentraler Lobus, postzentraler Gyrus	R	5/7/19/ 37/39/40	4716	11.82	46	-60	6
Cerebellum (nicht in Abbildung 6.3 abgebildet)	L		106	5.78	-24	-40	-42
	L/R		75	4.11	-2	-74	-32

Anmerkungen. BA, ungefähres Brodmann-Areal; Hem, Hemisphäre; L, links; R, rechts; MNI, Koordinaten des in SPM8 enthaltenen Standardgehirns des Montreal Neurological Institute;  $T_{max}$ , maximaler  $t$ -Wert des Clusters;  $k$ , Clustergröße in Voxeln. Die Aktivierungen werden für einen korrigierten Schwellenwert von  $p < .05$  berichtet, der sich aus einer Schwelle von  $p < .001$  ( $t > 3.36$ ) für jedes Voxel und einer minimalen Clustergröße von  $k > 47$  zusammensetzt (ermittelt mit AlphaSim; Ward, 2000).

### Altersabhängige Aktivierungsunterschiede beim Verfolgen von Objekten

Neben den eben beschriebenen altersgruppenübergreifenden Aktivierungen durch das Verfolgen von Objekten traten auch altersabhängige Veränderungen in den Aktivierungen auf. Unterschiede zwischen den Altersgruppen (unter Einbezug der Performanzunterschiede als Störvariablen in das Modell) wurden bilateral in MT mit Ausdehnung in okzipitale Areale, im rechten SPL mit Ausdehnung in den IPS und den Precuneus, im linken inferioren Parietallappen mit Ausdehnung in den IPS, im mittleren Teil des rechten cingulären Gyri und im rechten primären visuellen Kortex beobachtet (siehe Abbildung 6.4 und Tabelle 6.4).

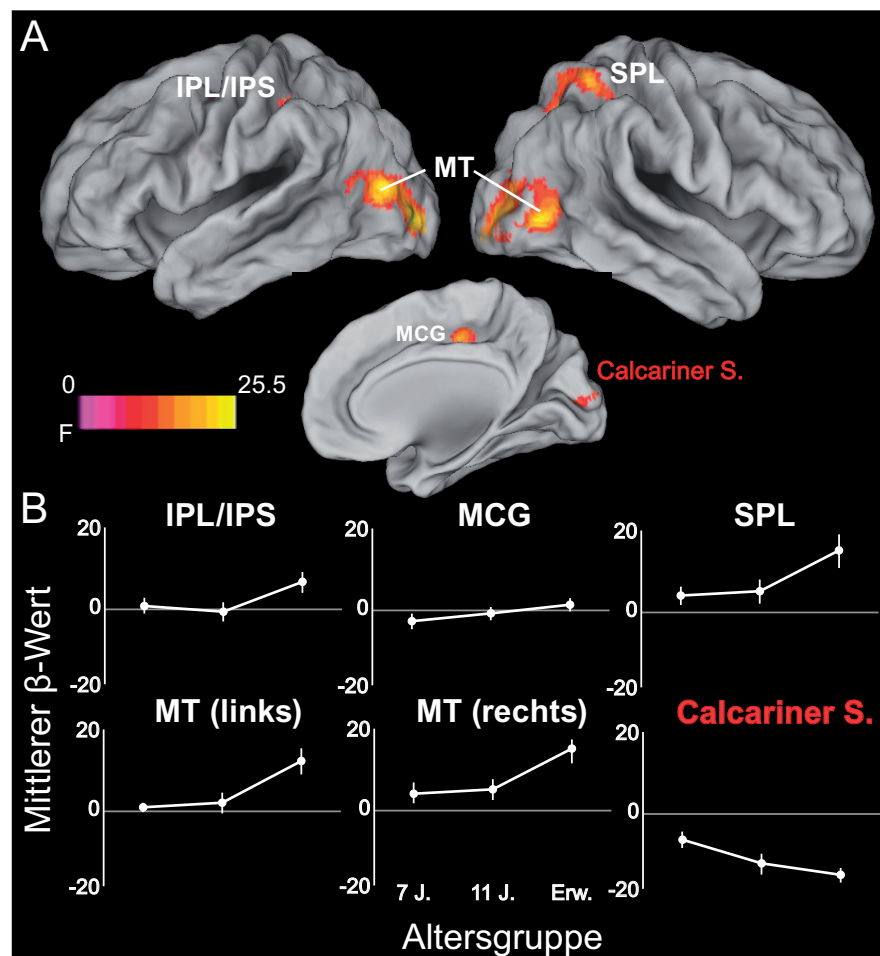


Abbildung 6.4: Altersabhängige Unterschiede in der neuronalen Aktivierung während des Verfolgens von Objekten. (A) Ergebnisse der ANOVA. Regionen mit Unterschieden in der neuronalen Aktivierung zwischen den Altersgruppen beim Verfolgen von Objekten: mittlerer cingulärer Gyri (14, -18, 44;  $F_{\max} = 16.6$ ), linker inferiorer parietaler Lobus/intraparietaler Sulcus (-42, -38, 46;  $F_{\max} = 14.14$ ), rechter superiorer und inferiorer parietaler Lobus (34, -50, 58;  $F_{\max} = 17.5$ ), mittlerer und inferiorer okzipito-temporaler Kortex (rechts: 46, -70, 0;  $F_{\max} = 23.34$ ; links: -44, -78, 12;  $F_{\max} = 25.51$ ), calcariner Sulcus (10, -90, 12;  $F_{\max} = 17.01$ ). Aktivierungen werden ab einer statistischen Schwelle von  $p < .05$  (korrigiert für multiple Vergleiche, siehe 6.1.1) dargestellt. Siehe Tabelle 6.4 für weitere Details. (B): Mittlere  $\beta$ -Werte der verschiedenen Altersgruppen in den Regionen mit altersbedingten Aktivierungsunterschieden beim Verfolgen von Objekten. Die Fehlerbalken stellen die 95 %-Konfidenzintervalle (unkorrigiert) dar. IPL/IPS, inferiorer parietaler Lobus und intraparietaler Sulcus; MCG, mittlerer cingulärer Gyri; MT, Bewegungsareal MT/V5; SPL, superiorer parietaler Lobus.

Tabelle 6.4: Regionen mit altersabhängigen Unterschieden in der neuronalen Aktivierung während des Verfolgens von Objekten ( $F$ -Statistik).

Anatomische Region	Hem	BA	$k$	$F_{max}$	MNI-Koordinaten		
					x	y	z
Mittlerer cingulärer Gyrus	R	24/31	175	16.60	14	-18	44
Inferiorer parietaler Lobus, intraparietaler Sulcus	L	40	113	14.14	-42	-38	46
Superiorer parietaler Lobus, anteriorer intraparietaler Sulcus, inferiorer parietaler Lobus, Precuneus, superiorer okzipitaler Gyrus	R	7/39/40	570	17.50	34	-50	58
Mittlerer temporaler Gyrus, inferiorer temporaler Gyrus, mittlerer okzipitaler Gyrus, superiorer okzipitaler Gyrus, inferiorer okzipitaler Gyrus, lingualer Gyrus	R	18/19/ 37/39	1296	23.34	46	-70	0
Mittlerer temporaler Gyrus, mittlerer okzipitaler Gyrus, inferiorer okzipitaler Gyrus, lingualer Gyrus	L	18/19/ 39	725	25.51	-44	-78	12
Calcariner Sulcus	R	17/18	78	17.01	10	-90	12

*Anmerkungen.* BA, ungefähres Brodmann-Areal; Hem, Hemisphäre; L, links; R, rechts; MNI, Koordinaten des in SPM8 enthaltenen Standardgehirns des Montreal Neurological Institute;  $F_{max}$ , maximaler  $F$ -Wert des Clusters;  $k$ , Clustergröße in Voxeln. Die Aktivierungen werden für einen korrigierten Schwellenwert von  $p < .05$  berichtet, der sich aus einer Schwelle von  $p < .001$  ( $F > 8.7$ ) für jedes Voxel und einer minimalen Clustergröße von  $k > 47$  zusammensetzt (ermittelt mit AlphaSim; Ward, 2000).

Die parietalen Regionen und MT zeigten ein ähnliches Muster entwicklungsbedingter Veränderungen mit einer Zunahme in der Höhe der Aktivierung zwischen 11 Jahren und dem Erwachsenenalter (beide  $t(21) > 4$ ,  $p < .0001$ ,  $r_{äquivalent} > .21$ ) und gleichbleibender Aktivierung zwischen 7 und 11 Jahren (beide  $t(21) < 1$ ,  $p > .34$ ,  $r_{äquivalent} > .21$ ). Ein anderes Muster zeigte sich im mittleren cingulären Gyrus, der einen monotonen Anstieg der Aktivierung zwischen 7 Jahren und dem Erwachsenenalter aufwies. Hierbei war die Veränderung zwischen 7 Jahren und dem Erwachsenenalter signifikant ( $t(22) = 3.80$ ,  $p < .005$ ,  $r_{äquivalent} = .63$ ), nicht jedoch zwischen 7 und 11 Jahren ( $t(21) = 1.69$ ,  $p = .11$ ,  $r_{äquivalent} = .35$ ) und zwischen 11 Jahren und dem Erwachsenenalter ( $t(21) = 2.33$ ,  $p = .03$ ,  $r_{äquivalent} = .45$ ;  $\alpha$ -Niveau von 5 % Bonferroni-korrigiert für 3 Vergleiche: 1.67 %). Die Aktivierungen im primären visuellen Kortex um den calcarinen Sulcus zeigten einen entgegengesetzten Entwicklungsverlauf. Sie verringerten sich zwischen dem 7. und dem 11.



Lebensjahr ( $t(21) = 4.04, p < .005, r_{\text{äquivalent}} = .66$ ) und noch einmal tendenziell zwischen dem 11. Lebensjahr und dem Erwachsenenalter ( $t(21) = 2.05, p = .053, r_{\text{äquivalent}} = .41$ ).

Die statistische Hypothese H9 trifft somit eingeschränkt zu. Es ist ein Anstieg der Aktivierung im PPC und MT zu beobachten. Dieser ist jedoch nicht stetig, sondern beschränkt sich auf die Altersspanne zwischen 11 Jahren und dem Erwachsenenalter. Zwischen 7 und 11 Jahren finden keine signifikanten Entwicklungsveränderungen in diesen Arealen statt. Die FEF zeigen, entgegen der Vorhersage, weder zwischen 7 und 11 Jahren, noch zwischen 11 Jahren und dem Erwachsenenalter einen Aktivierungsanstieg.

### ***Mit zunehmender Präzision der Selektion einhergehende Aktivierungen***

Die in 6.1.5 vorgestellten, leistungsbasierten Kriterien für die Auswahl der zu kontrastierenden Abstandsbedingungen wurden für die verschiedenen Altersgruppen von unterschiedlichen Paaren von Bedingungen erfüllt. Für die Siebenjährigen waren das die Bedingungen 5.6 und 11.2 Winkelminuten und für die Elfjährigen und die Erwachsenen die Bedingungen 2.8 und 5.6 Winkelminuten. Eine ANOVA mit den Faktoren Altersgruppe (7 Jahre, 11 Jahre vs. Erwachsene) und Abstand (groß vs. klein) zeigte, dass sich die Leistungsunterschiede zwischen diesen Abstandsbedingungen (Siebenjährige 43.75 %, Elfjährige 51.52 %, Erwachsene 39.58 %) nicht statistisch signifikant voneinander unterschieden ( $F(2, 32) = 1.50, p > .24, \eta^2 = .09$ ). Die absolute Höhe der Leistung (d.h. der Mittelwert von großer und kleiner Abstandsbedingung jeder Altersgruppe) unterschied sich jedoch zwischen den Altersgruppen ( $F(2, 32) = 12.12, p < .0001, \eta^2 = .43$ ). Dieser Unterschied wurde in den weiteren Analysen berücksichtigt, indem er als Störvariable in die fMRT-Analysen aufgenommen wurde.

Die Abnahme des Zielreiz-Distraktor-Abstandes führte über alle Altersgruppen hinweg zu einer erhöhten Aktivierung im bilateralen fronto-insulären Kortex (FIC) bestehend aus anteriorer Insula und inferiorem frontalem Gyrus, und den Basalganglien. Außerdem wurden ein großes bilaterales Cluster aus anteriorem cingulärem Kortex (ACC), medialem und lateralem superiorem frontalem Gyrus und dem supplementär-motorischen Kortex und ein Cluster aus Thalamus und den SC durch steigende Anforderungen an die räumliche Präzision der Selektion zunehmend aktiviert (siehe Abbildung 6.5 und Tabelle 6.5).

Die statistische Hypothese H10 muss somit abgelehnt werden. Entgegen der Vorhersage zeigt sich mit zunehmenden Anforderungen hinsichtlich der Präzision der Selektion keine Zunahme der Aktivierung in den FEF. Stattdessen ist ein Anstieg der Aktivierung in Regionen um den FIC und den ACC zu beobachten.

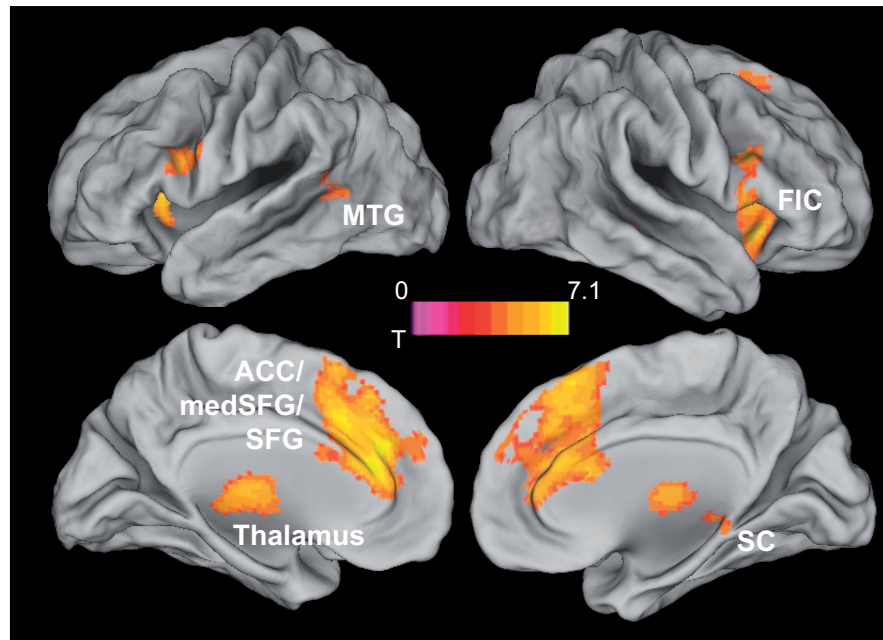


Abbildung 6.5: Altersunabhängige neuronale Aktivierungen, die mit zunehmenden Anforderungen an die Präzision der Selektion einhergehen. Aktivierungen werden ab einer statistischen Schwelle von  $p < .05$  (korrigiert für multiple Vergleiche, siehe 6.1.1) dargestellt. Siehe Tabelle 6.5 für weitere Details. ACC, anteriorer cingulärer Kortex; FIC, fronto-insulärer Kortex; MTG, mittlerer temporaler Gyrus; SC, superiorer Colliculus; SFG, superiorer frontaler Gyrus.

Tabelle 6.5: Altersunabhängige neuronale Aktivierungen, die mit zunehmenden Anforderungen an die Präzision der Selektion einhergehen ( $t$ -Statistik).

Anatomische Region	Hem	BA	$k$	$F_{max}$	MNI-Koordinaten		
					x	y	z
Anteriore Insula, Claustrum, Putamen, inferiorer frontaler Gyrus, präzentraler Gyrus	L	6/9/13/44/45/47	901	7.09	-34	22	8
Anteriore Insula, Claustrum, Putamen, inferiorer frontaler Gyrus, präzentraler Gyrus, mittlerer frontaler Gyrus	R	9/13/44/45/46/47	1008	6.69	30	20	-6
Anteriorer cingulärer Kortex, medialer superiorer frontaler Gyrus, superiorer frontaler Gyrus, supplementär-motorisches Areal, mittlerer cingulärer Kortex	R/L	6/8/9/10/24/32/33	4347	6.98	-8	38	26
Mittlerer temporaler Gyrus	R	21	82	4.17	56	-30	-8
Mittlerer temporaler Gyrus, superiorer temporaler Gyrus	L	22/39	108	4.05	-54	-56	10
Inferiorer temporaler Gyrus, mittlerer temporaler Gyrus, mittlerer okzipitaler Gyrus, inferiorer okzipitaler Gyrus	L		53	3.70	-46	-64	-8
Thalamus, superiore Colliculi, Mittelhirn	L/R		1294	5.41	-8	-14	8
Striatum	R		70	3.89	14	12	4
Cerebellum	L		128	4.17	-18	-50	-34

*Anmerkungen.* BA, ungefähres Brodmann-Areal; Hem, Hemisphäre; L, links; R, rechts; MNI, Koordinaten des in SPM8 enthaltenen Standardgehirns des Montreal Neurological Institute;  $T_{max}$ , maximaler  $t$ -Wert des Clusters;  $k$ , Clustergröße in Voxeln. Die Aktivierungen werden für einen korrigierten Schwellenwert von  $p < .05$  berichtet, der sich aus einer Schwelle von  $p < .001$  ( $t > 3.36$ ) für jedes Voxel und einer minimalen Clustergröße von  $k > 47$  zusammensetzt (ermittelt mit AlphaSim; Ward, 2000).

### ***Altersabhängige Unterschiede in den der Auflösung der Aufmerksamkeit zugrunde liegenden Aktivierungen***

Schließlich wurden Altersunterschiede in den neuronalen Korrelaten zunehmend präziser räumlicher Selektion untersucht. Hierbei wurden wieder Leistungsunterschiede als Störvariablen in die Berechnungen miteinbezogen. Innerhalb des im vorhergehenden Abschnitt beschriebenen Netzwerkes, welches einen Anstieg der Aktivierung bei präziserer Selektion zeigt, wurden Altersunterschiede in einer Region – dem ACC – beobachtet. Hier

verringerte sich die mit zunehmender Präzision einhergehende Aktivierung zwischen 7 und 11 Jahren ( $t(21) = 4.92$ ,  $p < .0001$ ,  $r_{\text{äquivalent}} = .73$ ) und stieg von 11 Jahren zum Erwachsenenalter tendenziell wieder an ( $t(21) = 2.34$ ,  $p = .029$ ,  $r_{\text{äquivalent}} = .46$ ;  $\alpha$ -Niveau von 5 % Bonferroni-korrigiert für 3 Vergleiche: 1.67 %; siehe Abbildung 6.6 und Tabelle 6.6). Daneben zeigten vier Regionen, die weder zum präzisionsbezogenen noch zum frontoparietalen Tracking-Netzwerk gehörten, eine Verringerung der Aktivierung zwischen 7 und 11 Jahren (alle  $t(21) > 4.14$ ,  $p < .0001$ ,  $r_{\text{äquivalent}} > .69$ ) und einen Anstieg der Aktivierung zwischen 11 Jahren und dem Erwachsenenalter (alle  $t(21) > 2.97$ ,  $p < .009$ ,  $r_{\text{äquivalent}} > .54$ ). Bei diesen Regionen handelte es sich um den superioren frontalen Gyrus, den postzentralen Gyrus, den Precuneus und den lateralen okzipitalen Kortex. Der Vergleich der präzisionsbezogenen Aktivierungen von Siebenjährigen und Erwachsenen deutet auf vergleichbare Aktivierungen im superioren frontalen Gyrus ( $t(22) = 0.16$ ,  $p = .87$ ,  $r_{\text{äquivalent}} = .03$ ) und im lateralen okzipitalen Kortex ( $t(22) = 1.53$ ,  $p = .14$ ,  $r_{\text{äquivalent}} = .31$ ) hin. Im Vergleich zu den Siebenjährigen reduzierte Aktivität zeigten die Erwachsenen hingegen im ACC ( $t(22) = 3.31$ ,  $p < .005$ ,  $r_{\text{äquivalent}} = .58$ ) und tendenziell im Precuneus ( $t(22) = 2.55$ ,  $p = .018$ ,  $r_{\text{äquivalent}} = .48$ ) sowie im posterioren cingulären Gyrus ( $t(22) = 2.29$ ,  $p = .032$ ,  $r_{\text{äquivalent}} = .44$ ).

Auch die statistische Hypothese H11, die besagt, dass es einen altersabhängigen Anstieg der Aktivierung der FEF mit zunehmenden Anforderungen an die Präzision der Selektion gibt, trifft nach den vorliegenden Daten nicht zu. Dies ist jedoch naheliegend, da bereits die zugrunde liegende statistische Hypothese H10 nicht zutraf. Statt der Steigerung der Aktivierung in den FEF zeigten sich sowohl zunehmende als auch sinkende Aktivierungen im ACC und in vier weiteren Arealen außerhalb des Netzwerkes, das im letzten Abschnitt als Korrelat zunehmender Anforderungen hinsichtlich der räumlichen Präzision der Selektion identifiziert worden war.

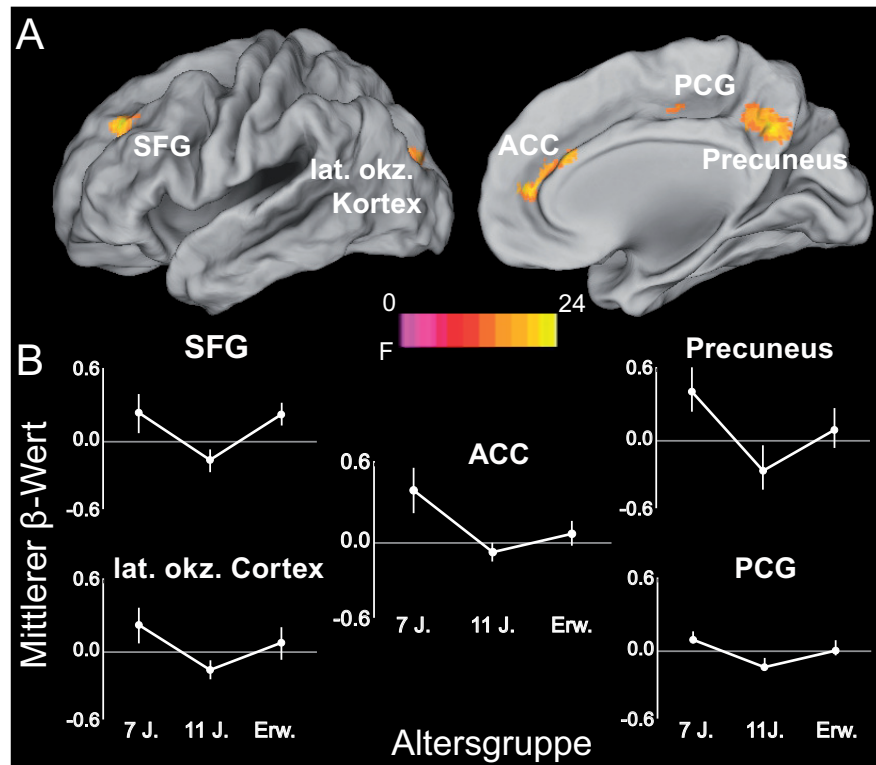


Abbildung 6.6: Altersabhängige Unterschiede in den neuronalen Aktivierungen, die mit zunehmenden Anforderungen an die Präzision der Selektion einhergehen. (A) Ergebnisse der ANOVA. Regionen mit altersabhängigen Unterschieden in der neuronalen Aktivierung bei einem Anstieg der Anforderungen an die Präzision der Selektion: Linker superiorer und mittlerer frontaler Gyrus ( $-24, 40, 36$ ;  $F_{\max} = 15.86$ ), anteriorer cingulärer Kortex ( $14, 50, 12$ ;  $F_{\max} = 19.5$ ), linker posteriorer cingulärer Gyrus ( $-26, -36, 36$ ;  $F_{\max} = 23.97$ ), Precuneus ( $4, -56, 36$ ;  $F_{\max} = 15.4$ ), linker superiorer/mittlerer okzipitaler Gyrus ( $-20, -88, 22$ ;  $F_{\max} = 11.69$ ). Aktivierungen werden ab einer statistischen Schwelle von  $p < .05$  (korrigiert für multiple Vergleiche, siehe 6.1.1) dargestellt. Siehe Tabelle 6.6 für weitere Details. (B) Mittlere  $\beta$ -Werte der verschiedenen Altersgruppen in den Regionen mit altersbedingten Aktivierungsunterschieden bei zunehmender Präzision der Selektion. Die Fehlerbalken stellen die 95 %-Konfidenzintervalle (unkorrigiert) dar. ACC, anteriorer cingulärer Kortex; PCG, posteriorer cingulärer Gyrus; SFG, superiorer frontaler Gyrus.

Tabelle 6.6: Altersabhängige Unterschiede in den neuronalen Aktivierungen, die mit zunehmenden Anforderungen an die Präzision der Selektion einhergehen ( $F$ -Statistik).

Anatomische Region	Hem	BA	$k$	$F_{max}$	MNI-Koordinaten		
					x	y	z
Anteriorer cingulärer Kortex, medialer superiorer frontaler Gyrus	R	10/32	193	19.50	14	50	12
Superiorer frontaler Gyrus, mittlerer frontaler Gyrus	L	9	64	15.86	-24	40	36
Posteriorer cingulärer Gyrus, postzentraler Gyrus, präzentraler Gyrus, mittlerer frontaler Gyrus	L	31	469	23.97	-26	-36	36
Precuneus, posteriorer cingulärer Gyrus, mittlerer cingulärer Gyrus	R/L	7/31	535	15.40	4	-56	36
Superiorer okzipitaler Gyrus, mittlerer okzipitaler Gyrus, mittlerer temporaler Gyrus	L	18/19	122	11.69	-20	-88	22

*Anmerkungen.* BA, ungefähres Brodmann-Areal; Hem, Hemisphäre; L, links; R, rechts; MNI, Koordinaten des in SPM8 enthaltenen Standardgehirns des Montreal Neurological Institute;  $F_{max}$ , maximaler  $F$ -Wert des Clusters;  $k$ , Clustergröße in Voxeln. Die Aktivierungen werden für einen korrigierten Schwellenwert von  $p < .05$  berichtet, der sich aus einer Schwelle von  $p < .001$  ( $F > 8.7$ ) für jedes Voxel und einer minimalen Clustergröße von  $k > 47$  zusammensetzt (ermittelt mit AlphaSim; Ward, 2000).

### 6.3 Diskussion

Experiment 3 zielte darauf ab, die neuronalen Grundlagen der Entwicklung der Auflösung der Aufmerksamkeit zu untersuchen. Hierzu wurde die Hirnaktivierung (d.h. das BOLD-Signal) während einer Object-Tracking-Aufgabe mit variierendem Abstand zwischen einem zu verfolgendem Zielreiz und mehreren Distraktoren bei sieben- und elfjährigen Kindern sowie bei Erwachsenen gemessen. Über alle Altersgruppen hinweg sank die Aufgabengenaugigkeit bei abnehmendem Zielreiz-Distraktor-Abstand und damit der Anforderung, den Fokus der Aufmerksamkeit zunehmend enger zusammenzuziehen. Dabei sank die Leistung mit abnehmendem Abstand bei Erwachsenen und Elfjährigen langsamer als dies bei den Siebenjährigen der Fall war. Erwachsene und Elfjährige unterschieden sich in der schwersten Bedingung, aber nicht in den anderen Bedingungen. In Anbetracht der ähnlichen Leistungsverläufe von Erwachsenen und Elfjährigen, lässt sich daher aus den Verhaltensdaten schließen, dass die größte Entwicklungsveränderung in der Fähigkeit, den Fokus der Aufmerksamkeit zusammenzuziehen, zwischen 7 und 11 Jahren stattfindet.

Das Verfolgen eines Objektes mit Aufmerksamkeit aktivierte über alle Altersgruppen hinweg ein Netzwerk aus bilateralem SPL, AIPS, PIPS, FEF und MT. Eine Teilmenge dieser

Regionen, nämlich der rechte SPL, der linke IPL/IPS sowie bilateral das Bewegungsareal MT, zeigte darüber hinaus einen altersabhängigen Aktivierungsanstieg während des Verfolgens eines Objektes. Gleichzeitig zeigte eine Region um den calcarinen Sulcus eine entwicklungsbegleitende Abnahme der Aktivierung. Erhöhte Anforderungen an die Präzision der Selektion, also ein Zusammenziehen des Aufmerksamkeitsfokus, zog die Aktivierung eines anderen Netzwerkes – bestehend aus kortikalen (FIC und ACC) und subkortikalen Regionen (SC, Thalamus und Striatum) – nach sich. Entwicklungsbedingte Veränderungen in den Aktivierungen, die mit einer höheren Auflösung des Aufmerksamkeitsfokus einhergehen, wurden in einer dieser Regionen – nämlich dem ACC – beobachtet. Daneben wurden jedoch zusätzlich entwicklungsbedingte Aktivierungsveränderungen im linken superioren frontalen Gyrus, dem Precuneus, dem posterioren cingulären Gyrus und bilateral im lateralen okzipito-temporalen Kortex sichtbar. Im Folgenden soll die Bedeutung dieser Ergebnisse für das Verständnis der Entwicklung der visuell-räumlichen Aufmerksamkeit und der Fähigkeit, die Größe des Fokus der Aufmerksamkeit zu kontrollieren, diskutiert werden.

### **6.3.1 Neurokognitive Entwicklung des Trackingnetzwerkes**

Die Regionen, die beim attentionalen Verfolgen eines Objektes über alle Altersgruppen hinweg aktiviert wurden, stimmen mit dem aus früheren Studien bekannten Tracking-Netzwerk (Culham et al., 1998; Culham et al., 2001; Howe et al., 2009; Jovicich et al., 2001) überein. Dieses entspricht größtenteils (d.h. abgesehen vom Bewegungsareal MT) dem frontoparietalen Netzwerk, welches bei der willentlichen Ausrichtung selektiver Aufmerksamkeit aktiviert wird (Baluch & Itti, 2011; Corbetta & Shulman, 2002; Yantis, 2008; vgl. 2.4.1). Innerhalb des Tracking-Netzwerkes wiesen in der vorliegenden Studie parietale Regionen und das Bewegungsareal MT einen verzögerten Entwicklungsverlauf auf. Dieser war durch einen bedeutsamen Anstieg der neuronalen Aktivierung, vor allem zwischen 11 Jahren und dem Erwachsenenalter, charakterisiert. Dass dieses Entwicklungsmuster nicht auf Performanzunterschiede, sondern tatsächlich auf neuronale Entwicklungsveränderungen zurückzuführen ist, kann aus zwei Gründen geschlossen werden. Erstens zeigten sich die deutlichsten Leistungsveränderungen zwischen 7 und 11 Jahren, während die stärkste Veränderung der neuronalen Aktivierungen zu einem anderen Zeitpunkt, nämlich zwischen 11 Jahren und dem Erwachsenenalter, zu beobachten war. Zweitens wurden die Leistungsunterschiede zwischen den Altersgruppen in der fMRT-Datenanalyse statistisch kontrolliert. Die verzögerte Entwicklung innerhalb des Tracking- und Aufmerksamkeitsnetzwerkes unterschied sich deutlich von dem Entwicklungsmuster des primären visuellen Kortex. Hier zeigte sich, entgegengesetzt zum Entwicklungsverlauf des

Tracking-Netzwerkes, ein altersbedingter Rückgang der durch das Tracking hervorgerufenen neuronalen Aktivität, und dies war besonders zwischen 7 und 11 Jahren der Fall.

Aus den beobachteten Ergebnissen lassen sich drei Schlussfolgerungen ableiten. Erstens bestätigen die vorliegenden Ergebnisse Studien, die während des Verfolgens von Objekten Aktivierungen des typischen Tracking-Netzwerkes auch bei Elfjährigen (Beaton et al., 2010) oder, allgemeiner gesprochen, einen hohen Grad der Übereinstimmung zwischen den Aktivierungen von Kindern und Erwachsenen während der Ausrichtung willentlicher Aufmerksamkeit, beobachteten (Booth et al., 2003; Wendelken et al., 2011). Ebenfalls bestätigen die hier gewonnenen Ergebnisse Imaging-Studien zur Entwicklung des visuell-räumlichen Arbeitsgedächtnisses, in denen auch schon im Kindesalter eine Aktivierung des fronto-parietalen Netzwerkes beobachtet werden konnte (z.B. Klingberg et al., 2002; Kwon et al., 2002).

Zweitens deutet der in der vorliegenden Studie beobachtete altersbedingte Aktivierungsanstieg im PPC darauf hin, dass zunehmend auf diese Region und die ihr zugeschriebenen Funktionen zurückgegriffen wird, um die selektive Aufmerksamkeit im Raum auszurichten. Dieses Ergebnis ähnelt dem von Velanova, Wheeler und Luna (2008), die zwischen der Kindheit und dem Erwachsenenalter während einer Anti-Sakkaden-Aufgabe ebenfalls einen Aktivierungsanstieg im PPC beobachteten. Wie in 2.4.1 erläutert, wird bezüglich des PPC angenommen, dass er, gemeinsam mit den FEF, eine Prioritätskarte des visuellen Feldes bildet (Baluch & Itti, 2011), in der die spezifische Funktion des PPC darin besteht, visuell-räumliche, motorische und kognitive Informationen zu integrieren, um schließlich eine Repräsentation der Relevanz der verschiedenen Orte im visuellen Feld zur Verfügung zu stellen, die leicht in Verhalten umgesetzt werden kann (Gottlieb, 2007; Gottlieb & Balan, 2010). Es wäre denkbar, dass Kinder mit steigendem Alter diese Repräsentation zunehmend nutzen, um ihre Leistung in Aufmerksamkeit erfordernden Aufgaben zu verbessern.

Drittens deuten die Ergebnisse darauf hin, dass eine qualitative Veränderung hinsichtlich der visuellen Areale, die zur aufmerksamkeitsmodulierten Verarbeitung während des Verfolgens von Objekten herangezogen werden, stattfindet. Genauer legen die Ergebnisse nahe, dass sich der Schwerpunkt der durch Aufmerksamkeit beeinflussten visuellen Verarbeitung von frühen visuellen Arealen bei Kindern zu höheren und damit stärker spezialisierten visuellen Arealen bei Erwachsenen verschiebt. Die im Vergleich mit den anderen Altersgruppen relativ hohe Aktivierung der primären visuellen Areale bei den Siebenjährigen (und in abgeschwächter Form bei den Elfjährigen) deutet darauf hin, dass die jüngeren Altersgruppen das Verfolgen



von Objekten vorwiegend durch eine Aufmerksamkeitsmodulation der frühen visuellen Areale unterstützen. Dies ist einleuchtend, da diese visuellen Bereiche sowohl strukturell (Giedd et al., 1999; Gogtay et al., 2004; Huttenlocher & de Courten, 1987; Lenroot et al., 2007; Sowell et al., 2003) als auch funktionell (Conner, Sharma, Lemieux & Mendola, 2004) zuerst, d.h. schon in der frühen Kindheit, reifen. Mit zunehmendem Alter scheint die trackingbezogene visuelle Verarbeitung jedoch immer mehr von dem auf die Wahrnehmung von Bewegung spezialisierten Areal MT (Maunsell, Nealey & DePriest, 1990) übernommen zu werden, wo in der vorliegenden Untersuchung ein altersabhängiger Anstieg der Aktivierung beobachtet werden konnte. Die schwächere MT-Aktivierung durch die jüngeren Altersgruppen legt nahe, dass dieses Areal in den jüngeren Altersgruppen noch nicht vollständig ausgereift ist. Dies wurde in früheren Studien tatsächlich sowohl in struktureller (Gogtay et al., 2004; Sowell et al., 2003; Westlye et al., 2010) als auch in funktioneller Hinsicht (Bucher et al., 2006; Klaver et al., 2008; Lichtensteiger, Loenneker, Bucher, Martin & Klaver, 2008) gezeigt. Die hier ermittelten Ergebnisse stützen somit den Vorschlag von Klaver et al. (2008), die ein generelles Entwicklungsprinzip darin vermuten, dass im Laufe der neuronalen Entwicklung einfachere visuelle Verarbeitungsmechanismen zunehmend durch stärker spezialisierte visuelle Mechanismen ersetzt werden. Die vorliegende Untersuchung zeigt, dass dies nicht nur beim passiven Verarbeiten von visuellen Informationen der Fall ist, sondern auch dann, wenn die Wahrnehmung durch Aufmerksamkeit moduliert wird.

### 6.3.2 Neuronale Grundlagen der Auflösung der Aufmerksamkeit

Entgegen der ursprünglich formulierten Hypothese, die einen Anstieg der Aktivität in den FEF mit abnehmendem Zielreiz-Distraktor-Abstand vermutete, wurde durch erhöhte Anforderungen hinsichtlich der Präzision der Selektion eine andere Gruppe von Hirnregionen aktiviert, nämlich der FIC, der mediale und laterale superiore frontale Kortex und der Thalamus/SC. Diese Areale entsprechen dem sogenannten *Salienznetzwerk* (Seeley et al., 2007), einem funktionellen Netzwerk mit den Kernkomponenten FIC und ACC, welches in Untersuchungen mit Resting-State-fMRT<sup>21</sup> identifiziert wurde (für ähnliche Befunde siehe Dosenbach, Fair, Cohen, Schlaggar & Petersen, 2008; Seeley et al., 2007; Sridharan, Levitin & Menon, 2008). Es wird vermutet, dass dieses Netzwerk in der Lage ist, die (neuronale) Salienz interner und externer Stimuli zu erhöhen, indem es die Menge der kognitiven Ressourcen, die zur Verarbeitung dieser Stimuli zur Verfügung stehen, erhöht (Menon &

---

<sup>21</sup> Der Begriff *Resting-State-fMRT* beschreibt funktionelle MRT, die durchgeführt wird, während der Proband keine Aufgabe erfüllt. Sie wird vor allem verwendet, um Interaktionen zwischen Hirnregionen zu untersuchen (Biswal, 2012).

Uddin, 2010). Dies wird vermutlich durch Kontrollsignale vom Salienznetzwerk zum fronto-parietalen Netzwerk erreicht, die dazu führen, dass der Stimulus, der sich im „Fokus“ des Salienznetzwerkes befindet, bevorzugten Zugang zu den neuronalen Aufmerksamkeits- und Gedächtnisressourcen erhält (Menon & Uddin, 2010). Das Salienznetzwerk scheint somit eine Verstärkung der neuronalen Repräsentation aufgabenrelevanter Stimuli zu bewirken, was als zentrale Funktion der selektiven Aufmerksamkeit angesehen werden kann (Menon & Uddin, 2010). Diese Vermutungen, die von Menon und Uddin (2010) zum sogenannten „Netzwerkmodell der Insula-Funktion“ zusammengefasst wurden, stehen im Einklang mit Studien, die zeigen, dass steigende perzeptuelle Anforderungen mit einem Anstieg der Aktivierung im FIC einhergehen (Christensen, Ramsoy, Lund, Madsen & Rowe, 2006; Deary et al., 2004; Grinband, Hirsch & Ferrera, 2006; für einen Review mit Fokus auf perzeptueller Entscheidungsfindung siehe Heekeren, Marrett & Ungerleider, 2008). Auf der Grundlage dieser Ergebnisse wurde ebenfalls vorgeschlagen, dass der FIC die Zuweisung von Verarbeitungsressourcen kontrolliert, welche die perzeptuelle Leistung verbessern können (Sterzer & Kleinschmidt, 2010). Die Ergebnisse der vorliegenden Studie deuten darauf hin, dass der Zusammenhang von perzeptuellen Anforderungen und FIC-Aktivität nicht nur für die recht eng umgrenzten visuellen Aspekte Stimulussichtbarkeit (Christensen et al., 2006; Deary et al., 2004) und Stimuluskontrast (Kleinschmidt, Büchel, Hutton, Friston & Frackowiak, 2002) gilt, sondern dass der FIC auch durch räumlich eng platzierte Stimuli aktiviert werden kann. Somit scheint es sich bei diesem Mechanismus um einen recht allgemeinen zu handeln, der bei einem breiten Spektrum visueller Anforderungen aktiviert wird. Anders herum deuten die hier gewonnenen Ergebnisse darauf hin, dass das Zusammenziehen des Aufmerksamkeitsfokus kein Effekt ist, der durch speziell aufmerksamkeitsbezogene und räumlich spezialisierte Strukturen vermittelt wird. Vielmehr scheint es das Produkt eines allgemeineren Mechanismus zu sein, der zudem nicht auf räumliche Aspekte beschränkt ist. Eine Verortung des „Zooms“ der Aufmerksamkeit im fronto-parietalen Netzwerk ist also nicht anzunehmen. Gleichzeitig ist es allerdings denkbar, dass die räumliche Zuordnung dieses Effektes auf späteren Verarbeitungsstufen dadurch geschieht, dass das fronto-parietale Netzwerk die bis dahin räumlich eher unspezifischen Signale in einen räumlichen Referenzrahmen übersetzt (für ähnliche Vorschläge siehe Knudsen, 2007; Menon & Uddin, 2010).

Innerhalb des Salienznetzwerkes werden den verschiedenen Komponenten unterschiedliche und fein aufeinander abgestimmte Funktionen zugeschrieben (Menon & Uddin, 2010). Hinsichtlich des FIC wird angenommen, dass er sowohl für die Detektion

verhaltensrelevanter oder perzeptuell salienter Stimuli (Seeley et al., 2007) als auch für die darauf folgende Zuweisung von Verarbeitungsressourcen zuständig ist (Crottaz-Herbette & Menon, 2006). Es wird vermutet, dass beides durch Kontrollsignale bewerkstelligt wird, welche im FIC generiert und anschließend an den ACC weitergeleitet werden (Crottaz-Herbette & Menon, 2006; Menon & Uddin, 2010). Hinsichtlich des ACC wird wiederum angenommen, dass er die vom FIC generierten Kontrollsignale aufrechterhält und sie erstens an Komponenten des fronto-parietalen Aufmerksamkeitsnetzwerkes und zweitens an kortikale Regionen, die mit Bewegung und Handlung in Verbindung gebracht werden, weiterleitet (Crottaz-Herbette & Menon, 2006; Menon & Uddin, 2010). Dass in den Ergebnissen der vorliegenden Untersuchung die Aktivität um den ACC in motorische Areale wie das SMA hineinreicht, scheint für diese Annahme zu sprechen.

Neben dem FIC und ACC zeigten auch die SC, die im Allgemeinen nicht als Teil des Salienznetzwerkes betrachtet werden, einen Aktivierungsanstieg bei zunehmenden Anforderungen an die Präzision der Selektion. Die SC werden, trotz ihrer subkortikalen Lage, als integraler Teil des fronto-parietalen Aufmerksamkeitsnetzwerkes betrachtet (Baluch & Itti, 2011; Lovejoy & Krauzlis, 2010; McPeck, 2008; Noudoost et al., 2010; vgl. 2.4.1). Neuere Untersuchungen deuten zudem darauf hin, dass die SC in enger Verknüpfung mit dem Thalamus arbeiten (Wurtz, McAlonan, Cavanaugh & Berman, 2011), welcher als subkortikale Komponente des Salienznetzwerkes vorgeschlagen wurde (Seeley et al., 2007) und der in der vorliegenden Untersuchung ebenfalls durch erhöhte Präzisionsanforderungen aktiviert wurde. Auf der Grundlage dieser Befunde soll hier vorgeschlagen werden, dass die räumlich zielgerichtete Modulation der visuellen Verarbeitung, die mit erhöhter Präzision in der Selektion einhergeht, nicht durch die kortikalen Komponenten des fronto-parietalen Netzwerkes, sondern durch eine Weiterleitung der im Salienznetzwerk generierten Kontrollsignale über den Thalamus und den SC bewerkstelligt wird.

### **6.3.3 Neurokognitive Entwicklung der Auflösung der Aufmerksamkeit**

Die neuronalen Strukturen, die für ein Zusammenziehen des Fokus der Aufmerksamkeit rekrutiert werden, sind bei Kindern und Erwachsenen bemerkenswert ähnlich. In der vorliegenden Untersuchung aktivierten bereits die Siebenjährigen das eben beschriebene Salienznetzwerk sowie die SC und den Thalamus. Dieses Ergebnis steht teilweise im Widerspruch zu anderen Entwicklungsstudien, welche mit Resting-State-fMRT und graphentheoretischen Methoden funktioneller Konnektivität darauf abzielten, die Entwicklung funktioneller Hirnnetzwerke nachzuzeichnen (Fair et al., 2009; Fair et al., 2007). Diese Studien legen nahe, dass sich die Organisation dieser Netzwerke bei Siebenjährigen deutlich

von der von Erwachsenen unterscheidet. Konkret demonstrierten diese Autoren, dass in diesem Alter das Salienznetzwerk und das fronto-parietale Netzwerk noch nicht vollständig voneinander getrennt sind und dass der ACC stärker mit fronto-parietalen Strukturen als mit den Komponenten des Salienznetzwerkes verknüpft ist. Die hier ermittelten Daten scheinen diesen Befund nicht zu stützen. Auch wenn in der vorliegenden Studie keine funktionelle Konnektivität untersucht wurde, deutet die gemeinsame Aktivierung von ACC und FIC in den vorliegenden Daten doch darauf hin, dass diese beiden Kernkomponenten des insulacingulären Salienznetzwerkes bereits bei Siebenjährigen eng zusammenarbeiten.

Die Ergebnisse der vorliegenden Studie weichen auch von früheren Studien ab, die entweder eine altersbedingte Zunahme (Bunge, Dudukovic, Thomason, Vaidya & Gabrieli, 2002; Houdé, Rossi, Lubin & Joliot, 2010) oder Abnahme (Supekar & Menon, 2012) der Aktivierung des FIC in Aufgaben mit Anforderungen an die kognitive Kontrolle beobachteten. Die vorliegenden Ergebnisse zeigen im Gegensatz zu diesen Studien eine erstaunliche Stabilität der FIC-Aktivierung über die untersuchten Altersgruppen hinweg, was auf eine erwachsenenähnliche Funktion des FIC ab einem frühen Alter hindeutet. Gleichzeitig zeigen die hier erhobenen Daten, dass die Aktivierung des ACC bei erhöhten Anforderungen an die Präzision der Selektion mit zunehmendem Alter abnimmt. Zwei Befunde aus Studien, die sich mit der Entwicklung der funktionellen Hirnnetzwerke beschäftigen, könnten helfen, diese Entwicklungsveränderung nachzuvollziehen. Erstens haben eine Reihe von Studien gezeigt, dass die Hirnentwicklung zwischen Kindheit und Erwachsenenalter dadurch gekennzeichnet ist, dass Kinder eher lokale Netzwerke aufweisen, während Erwachsene eher funktionelle Netzwerke haben, die sich aus weiter auseinanderliegenden Regionen zusammensetzen (Fair et al., 2009; Fair et al., 2007). In ähnlicher Weise ist die Konnektivität des anterioren und mittleren cingulären Kortex bei Kindern vorwiegend durch ein Muster diffuser lokaler Konnektivität gekennzeichnet, während der cinguläre Kortex der Erwachsenen stärker mit weiter entfernten Arealen verknüpft ist (Kelly et al., 2009). Es kann spekuliert werden, dass die erhöhte ACC-Aktivierung bei Kindern in der vorliegenden Studie auf dieses Konnektivitätsmuster zurückzuführen ist. So wäre es denkbar, dass Kinder bei den Verarbeitungsschritten, die Erwachsene mit den weit verteilten Netzwerken erledigen, mangels vorhandener Verknüpfungen auf die vorhandenen lokalen Netzwerke zurückgreifen und deswegen dort im Vergleich zu Erwachsenen eine höhere Aktivierung zu beobachten ist. Zweitens könnte die in der vorliegenden Studie beobachtete höhere ACC-Aktivierung bei den jüngeren Kindern darauf zurückzuführen sein, dass die funktionellen Verknüpfungen zwischen den Kernkomponenten des Salienznetzwerkes, also dem FIC und dem ACC, in der

Kindheit schwächer ausgeprägt sind als dies im Erwachsenenalter der Fall ist (Fair et al., 2009; Fair et al., 2007; Supekar & Menon, 2012; Uddin, Supekar, Ryali & Menon, 2011). Dies könnte dazu führen, dass die vom FIC gesendeten Signale nur in abgeschwächter Form im ACC ankommen. Dies wiederum könnte eine erhöhte Aktivierung des ACC nötig machen, um die geringere Stimulation des ACC zu kompensieren. Möglicherweise tragen beide Mechanismen gleichzeitig zu dem sich mit zunehmendem Alter verändernden Aktivierungsmuster des ACC bei. Weitere Forschung ist jedoch nötig, um diese Vorschläge genauer zu untersuchen.

Neben dem ACC wiesen eine Reihe zusätzlicher Regionen, die jedoch nicht dem Salienznetzwerk zugehören, in der jüngsten Altersgruppe eine ansteigende Aktivität bei höherer Anforderung an die Präzision der Selektion auf. Derartige Aktivierungen in zusätzlichen, nicht aufgabentypischen Regionen treten bei Kindern in fMRT-Entwicklungsstudien häufig auf (z.B. Konrad et al., 2005; Luna, Velanova & Geier, 2010; Rubia et al., 2010; Smith, Halari, Giampetro, Brammer & Rubia, 2011; Velanova et al., 2008). Sie werden gemeinhin als ineffiziente oder kompensatorische Aktivierung neuronaler Areale interpretiert, welche, so die Vorstellung, dadurch notwendig wird, dass Kinder noch nicht die „erwachsenen“ Netzwerke rekrutieren können (z.B. Geier et al., 2009). Ein Areal, in dem derartige zusätzliche Aktivierungen häufig auftreten, ist der Precuneus. Es wird angenommen, dass diese Struktur im Kindesalter deswegen oft zusätzliche Aktivierungen aufweist, da Kinder nur eingeschränkten Zugang zu den parietalen Strukturen haben, welche von den Erwachsenen für differenziertere Verarbeitungsschritte hinzugezogen werden (Scherf et al., 2006). Dies scheint auch in den vorliegenden Daten zuzutreffen, die ebenfalls eine stärkere Aktivierung des Precuneus in der jüngeren Kinderstichprobe, verglichen mit den anderen beiden Altersstichproben, zeigen.

#### **6.3.4 Schlussfolgerung**

Die vorliegende Untersuchung zeigt, dass bereits Siebenjährige beim Verfolgen von Objekten das kanonische Tracking-Netzwerk aktivieren, dass jedoch mit zunehmendem Alter auch zunehmend parietale Regionen rekrutiert werden. Auch war eine Verlagerung der das Tracking begleitenden neuronalen Aktivität von frühen visuellen Arealen bei Kindern zu höheren visuellen Arealen bei Erwachsenen zu beobachten. In Bezug auf die Präzision der Selektion ist eine wichtige Schlussfolgerung der vorliegenden Studie, dass willentliches Erhöhen der Genauigkeit der Selektion nicht durch eine höhere Aktivierung des fronto-parietalen Aufmerksamkeitsnetzwerkes, sondern durch eine höhere Aktivierung des insula-cingulären Salienznetzwerkes erreicht wird. Daneben scheint die Modulation der visuellen

Verarbeitung, die mit erhöhter Präzision in der Selektion einhergeht, durch eine Weiterleitung der Kontrollsignale über den SC bewerkstelligt zu werden. Bereits Siebenjährige aktivieren dieses Netzwerk bei erhöhten Anforderungen an die Präzision der Selektion. Gleichzeitig zeigten die Kindergruppen jedoch innerhalb des Salienznetzwerkes eine altersbedingte Abnahme der ACC-Aktivierung. Auch Strukturen außerhalb des Salienznetzwerkes wiesen einen Rückgang der Aktivierung zwischen 7 Jahren und dem Erwachsenenalter auf.

Zusammengenommen zeigen die Ergebnisse, dass neuronale Entwicklungsprinzipien, die in Bezug auf andere Aufgabenstellungen beobachtet wurden, auch auf Aspekte selektiver Aufmerksamkeit, nämlich die Fähigkeit zum Verfolgen von Objekten mit Aufmerksamkeit und die Fähigkeit, Objekte mit zunehmender räumlicher Präzision zu selektieren, zutreffen. In diesem Sinne werden die Netzwerke, die diesen beiden Fähigkeiten zugrunde liegen, prinzipiell bereits ab einem frühen Alter rekrutiert. Gleichzeitig wurden jedoch sowohl in quantitativer als auch in qualitativer Hinsicht Veränderungen in diesen Netzwerken beobachtet, welche als optimierte Rekrutierung von aufgabenrelevanten neuronalen Strukturen interpretiert werden können. Die vorliegenden Ergebnisse stützen somit ein sich abzeichnendes Bild einer im Laufe der Entwicklung zunehmenden Nutzung weit verteilter und funktionell spezialisierter Netzwerke. Diese neurofunktionelle Veränderung erlaubt es dem sich entwickelnden Beobachter, Aufgaben, die auf visuell-räumlicher Aufmerksamkeit basieren, mit zunehmender räumlicher Präzision auszuführen.

## 7 Allgemeine Diskussion

Das Ziel der vorliegenden Untersuchung bestand darin, die Entwicklung der Auflösung der Aufmerksamkeit im Kindes- und frühen Jugendalter zu charakterisieren und die der Entwicklung zugrunde liegenden Mechanismen zu untersuchen. Zur Untersuchung dieser Fragestellung wurde das Object-Tracking-Paradigma in zwei Verhaltensexperimenten und einem fMRT-Experiment bei Kindern unterschiedlicher Altersgruppen und bei Erwachsenen verwendet. In der ersten Studie wurden sieben-, neun-, elf- und dreizehnjährigen Kindern sowie Erwachsenen das Object-Tracking-Paradigma mit variierendem Abstand zwischen Zielreiz und Distraktoren dargeboten, um den kritischen Abstand der verschiedenen Altersgruppen bestimmen und den Entwicklungsverlauf des kritischen Abstandes über den beobachteten Altersbereich beschreiben zu können. In diesem Entwicklungsverlauf zeigten sich bedeutsame altersbedingte Veränderungen der Auflösung der Aufmerksamkeit. Der kritische Abstand nahm zwischen 7 und 11 Jahren bedeutend ab, blieb zwischen 11 Jahren und 13 Jahren gleich und sank dann noch einmal bedeutsam zum Erwachsenenalter hin. Der kritische Abstand der Siebenjährigen war etwa dreimal, der kritische Abstand der Elfjährigen etwa doppelt so groß wie der der Erwachsenen. In einer Kontrollaufgabe konnte gezeigt werden, dass sich die dynamische Sehschärfe, gemessen mit einer Stimuluskonfiguration, die der des Tracking-Experiments ähnlich war, im gleichen Alterszeitraum nicht veränderte, woraus geschlossen werden kann, dass die Veränderung der Auflösung der Aufmerksamkeit nicht auf die Entwicklung dieser – der Auflösung der Aufmerksamkeit möglicherweise zugrunde liegenden – visuellen Fähigkeit zurückzuführen ist. In der zweiten Studie wurde in der Object-Tracking-Aufgabe neben dem Abstand zwischen Zielreiz und Distraktoren die Anzahl der Zielreize in zwei Stufen (zwei vs. drei Objekte) variiert. Es zeigte sich hier, dass der kritische Abstand von zwei zu drei Zielreizen über alle Altersgruppen hinweg anstieg. Die Reduktion der pro Zielreiz zur Verfügung stehenden Verarbeitungsressourcen bewirkte somit, dass der Fokus der Aufmerksamkeit weniger eng zusammen gezogen werden konnte. Das Ausmaß des Anstiegs des kritischen Abstandes in den verschiedenen Altersgruppen zeichnete zudem den Entwicklungsverlauf der Auflösung der Aufmerksamkeit in Experiment 1 nach. Das heißt, dass der kritische Abstand von zwei zu drei Objekten bei Kindern stärker als bei Erwachsenen zunahm und innerhalb der Kinderstichproben in den Altersgruppen besonders zunahm, die in Experiment 1 eine geringere Auflösung der Aufmerksamkeit gezeigt hatten. Hieraus lässt sich schließen, dass bei Kindern die Verringerung der pro Objekt zur Verfügung stehenden Verarbeitungsressourcen in besonderem Maße dazu führte, dass sie den Fokus der

Aufmerksamkeit weniger eng zusammenziehen konnten. Dies deutet darauf hin, dass die in Experiment 1 beobachtete Entwicklung der Auflösung der Aufmerksamkeit damit im Zusammenhang steht, dass den jüngeren Altersgruppen nicht ausreichend Verarbeitungsressourcen zur Verfügung stehen, um den Aufmerksamkeitsfokus so eng wie Erwachsene zusammenzuziehen. Für diesen Zusammenhang zwischen Auflösung der Aufmerksamkeit und zur Verfügung stehenden Verarbeitungsressourcen spricht auch ein bedeutsamer Zusammenhang zwischen den individuellen Schwellenwert-Differenzen und den individuellen Werten im visuell-räumlichen Arbeits- und Kurzzeitgedächtnis. In der dritten Studie wurden die neuronalen Korrelate der Auflösung der Aufmerksamkeit bei sieben- und elfjährigen Kindern und bei Erwachsenen verglichen. Entgegen der Erwartung, dass erhöhte Anforderungen an die Präzision der Selektion mit einer erhöhten Aktivierung der FEF einhergehen würden, führte das Zusammenziehen des Fokus der Aufmerksamkeit zu einem Anstieg der neuronalen Aktivität im Salienznetzwerk aus FIC, ACC und Thalamus. Die Aktivierung dieser Areale wies eine hohe Stabilität zwischen 7 Jahren und dem Erwachsenenalter auf. Gleichzeitig zeigten sich jedoch auch Abweichungen in den Aktivierungsmustern von Kindern und Erwachsenen. Innerhalb des Netzwerkes, das über alle Altersgruppen als Antwort auf erhöhte Anforderungen an die Präzision der Selektion aktiviert wurde, zeigte sich eine altersbedingte Reduktion der Aktivierung im ACC. Daneben wurden zusätzlich entwicklungsbedingte Aktivierungsabweichungen im linken superioren frontalen Gyrus, dem Precuneus, dem posterioren cingulären Gyrus und bilateral im lateralen okzipitotemporalen Kortex sichtbar. Dies deutet darauf hin, dass bei Kindern ein Zusammenziehen des Fokus der Aufmerksamkeit durch Kontrollsignale aus von Erwachsenen abweichenden Arealen geleistet wird. Dies resultiert möglicherweise letzten Endes darin, dass die visuellen Zielregionen nicht so präzise moduliert werden können, wie dies bei Erwachsenen der Fall ist. Im Folgenden sollen die Ergebnisse der verschiedenen Ergebnisse integriert betrachtet werden (7.1) und mit dem integrativen Modell aus Abschnitt 2.5 verknüpft werden (7.2). Die hier gewonnenen Befunde sollen zudem in Bezug zu einer verwandten Theorie der Selektion, der *Load-Theorie* von Lavie (Lavie, 1995; Lavie et al., 2004), gesetzt werden (7.3). In Abschnitt 7.4 werden alternative Interpretationen der Ergebnisse diskutiert und anschließend wird die Bedeutung der hier beobachteten Befunde für den Erwerb und Einschränkungen der Lesefähigkeit erörtert (7.5). Das Kapitel schließt mit einer zusammenfassenden Schlussfolgerung (7.6)



## 7.1 Integration der Ergebnisse aus Experiment 2 und 3

Sowohl Experiment 2 als auch Experiment 3 zielten darauf ab, die Mechanismen, die der Auflösung der Aufmerksamkeit zugrunde liegen, zu untersuchen. Die Ergebnisse der beiden Experimente, die bisher isoliert betrachtet wurden, sollen im Folgenden integriert werden.

Hierzu wird zunächst der Frage nachgegangen, inwieweit sich die Schlussfolgerung aus Experiment 2, dass ein Zusammenziehen des Fokus der Aufmerksamkeit mit erhöhtem Ressourcenaufwand einhergeht, durch die Ergebnisse von Experiment 3 stützen lässt. Experiment 3 ergab, dass ein zunehmendes Zusammenziehen des Aufmerksamkeitsfokus mit einer erhöhten Aktivierung der Komponenten des Salienznetzwerkes, des SC und visueller Areale einhergeht. Einen Bezug zwischen diesem Aktivierungsmuster – insbesondere einer Aktivierung des insula-cingulären Salienznetzwerkes – und einer Ressourcensichtweise stellt das bereits in 6.3.2 angesprochene *Netzwerk-Modell der Insula-Funktion* von Menon und Uddin (2010) her. In diesem Modell wird vorgeschlagen, dass das Salienznetzwerk die Menge der kognitiven Ressourcen, die zur Verarbeitung eines Stimulus aufgebracht werden, erhöhen kann, indem es Kontrollsignale generiert, welche über eine Aktivierung des fronto-parietalen Netzwerkes eine Modulation der im aktuellen Zusammenhang relevanten visuellen Areale bewirken. Gemäß dem Modell geht dieser Prozess auch mit einem Aktivierungsanstieg in den Komponenten des Salienznetzwerkes selbst einher. Diese Aktivierung des Salienznetzwerkes interpretierten Sterzer und Kleinschmidt (2010) als Ausdruck der Rekrutierung von Verarbeitungsressourcen, die mit kognitiver Anstrengung gleichzusetzen ist. Eine erhöhte Aktivierung des Salienznetzwerkes und des fronto-parietalen Aufmerksamkeitsnetzwerkes, wie sie auch in der vorliegenden Untersuchung zu beobachten war (von den Komponenten des fronto-parietalen Netzwerkes wurden hier die superioren Colliculi aktiviert), deutet also auf einen erhöhten Ressourcenverbrauch hin. Dieser erhöhte Ressourcenverbrauch wurde in der vorliegenden Untersuchung durch höhere Anforderungen an die Präzision der Selektion hervorgerufen. Dies lässt den Schluss zu, dass ein Zusammenziehen des Fokus der Aufmerksamkeit einen erhöhten Ressourcenverbrauch mit sich bringt. Die Schlussfolgerung aus Experiment 2 ist demnach durchaus kompatibel mit den Ergebnissen von Experiment 3. Letztere spezifizieren darüber hinaus, worin genauer der erhöhte Ressourcenverbrauch besteht, nämlich in einem Anstieg der Aktivierung des Salienznetzwerkes und Teilen des fronto-parietalen Netzwerkes.

Ebenfalls wurde aus Experiment 2 geschlossen, dass die Entwicklung der Auflösung der Aufmerksamkeit auf einer Zunahme der verfügbaren Verarbeitungsressourcen basiert. Wie lässt sich diese Schlussfolgerung mit den Veränderungen der neuronalen Aktivierung, die in

Experiment 3 für die verschiedenen Altersstufen bei zunehmender Anforderung an die Präzision der Selektion beobachtet wurden, integrieren? Die Vergleiche der Altersstufen in Experiment 3 zeigen, dass die verschiedenen Altersgruppen bei zunehmender Präzision der Selektion in den Komponenten des Salienznetzwerkes und des fronto-parietalen Netzwerkes – also den Arealen, die mit Ressourcenaufwand und Ressourcenzuwendung in Verbindung gebracht werden – ähnliche Aktivierungen zeigen. Lediglich im ACC weisen die verschiedenen Altersgruppen unterschiedliche Aktivierungen auf, wobei sich der Unterschied im Falle der Siebenjährigen jedoch als im Vergleich zu den beiden anderen Altersgruppen stärkere Aktivierung ausgestaltet. Dies deutet darauf hin, dass bereits die Siebenjährigen, sieht man die Aktivierungen des Salienznetzwerkes und des fronto-parietalen Netzwerkes als Indices der Ressourcenaktivierung an, zumindest in einem ersten Schritt in gleichem Maße wie Erwachsene Ressourcen mobilisieren können, um die Verarbeitung in den untergeordneten Netzwerken zu modulieren. Trotz ähnlicher Aktivierung von Salienz- und fronto-parietalem Netzwerk ist die Performanz der Kinder jedoch geringer als die der Erwachsenen. Es scheint also, als würden die im Salienznetzwerk generierten Signale auf ihrem weiteren Weg „verpuffen“. Bei den jüngeren Kindern könnte dieses Verpuffen mit der Aktivierung zusätzlicher, zumindest bei Erwachsenen nicht aufgabenrelevanter Areale (Precuneus, postzentraler Gyrus und lateraler okzipitaler Kortex), erklärt werden. Die Ergebnisse von Experiment 3 deuten also darauf hin, dass die nötigen Verarbeitungsressourcen bei den Siebenjährigen an sich vorhanden sind, bzw. dass sie mobilisiert werden können; sie scheinen jedoch nicht den Effekt hervorzurufen, der bei Erwachsenen beobachtet wird. Stattdessen scheinen die Kinder sie für zusätzliche oder „unnötige“ Verarbeitungen zu verwenden.

Die beobachteten Ergebnisse erlauben auch Rückschlüsse hinsichtlich der Entwicklungstheorien, die zur Erklärung der beobachteten Veränderungen herangezogen werden können. So sprechen die Daten der Siebenjährigen dafür, dass Entwicklungstheorien, die einen einfachen Anstieg der Verarbeitungskapazität als Ursache der Entwicklung betrachten (Cowan et al., 2005; Halford et al., 1998; Pascual-Leone, 1970), in dieser Einfachheit nicht zu halten sind. Die neurofunktionellen Daten der vorliegenden Studie deuten in Kombination mit den Verhaltensdaten eher darauf hin, dass zwar ausreichend Ressourcen rekrutiert werden, dies aber nicht den gleichen Effekt wie bei Erwachsenen erzielt. Dies ist kompatibel mit Theorien wie denen von Case et al. (1982) und Demetriou und Mouyi (2011), in denen davon ausgegangen wird, dass die Verarbeitungseffizienz zunimmt

und somit bei gleichbleibender Verarbeitungskapazität die Menge der *verfügbaren* Ressourcen zunimmt.

Das neurofunktionelle Ergebnismuster der Elfjährigen weicht von dem der Siebenjährigen ab. Sie zeigen sowohl im ACC als auch im Precuneus, dem postzentralen Gyrus, dem lateralem okzipitalen Kortex und dem superioren frontalen Gyrus *geringere* Aktivierungen als die Erwachsenen. Es ist wenig naheliegend anzunehmen, dass sie nicht in der Lage wären, die Areale ähnlich stark wie Erwachsene zu aktivieren, da bereits Siebenjährige in diesen Arealen Aktivierungen zeigen, die auf oder zum Teil sogar über dem Niveau der Erwachsenen liegen. Es scheint somit, als würde die Aktivierung dieser Areale nach einer zu starken Aktivierung in der mittleren Kindheit nun „eingespart“ werden. Dies ließe sich im Sinne einer Überregulation interpretieren und es scheint, als müsste sich das optimale Niveau der Aktivierung erst einpendeln.

Auch die Ergebnisse der Elfjährigen scheinen aus theoretischer Perspektive eher mit einer Theorie mangelnder *verfügbarer* Ressourcen vereinbar als mit Theorien mangelnder *vorhandener* Ressourcen. Basierend auf dem Hintergrundwissen, dass die älteren Kinder zwar prinzipiell in der Lage sind, die entsprechenden Aktivierungen zu generieren (wie bei den Siebenjährigen sichtbar wurde), es möglicherweise vor dem Hintergrund einer Überregulation aber nicht tun, sind die Befunde der geringeren Aktivierung sowohl im ACC als auch in verschiedenen weiteren Regionen ein Hinweis darauf, dass die nötigen Ressourcen zwar prinzipiell vorhanden, aber in dem relevanten Moment nicht verfügbar sind. Die Theorie mangelnder verfügbarer Ressourcen scheint somit ein sparsames Modell zu sein, mit dem der komplette Entwicklungsverlauf beschrieben werden kann.

## 7.2 Rückbezug auf das integrative Modell

Das in 2.5 dargestellte integrative Modell auf der Grundlage des Selective-Tuning-Modells von Tsotsos und Kollegen (Tsotsos, 1990, 2005) kann nun einerseits im Hinblick auf die relevanten neuronalen Strukturen und andererseits um eine Entwicklungsperspektive erweitert bzw. konkretisiert werden. In Bezug auf die relevanten neuronalen Strukturen hat sich gezeigt, dass sich das fronto-parietale Netzwerk nicht als ultimative Quelle der die visuelle Verarbeitung modulierenden Biassignale halten lässt, sondern dass das Salienznetzwerk die oberste Instanz der hierarchischen Verarbeitung darstellt. Zudem legen die vorliegenden Ergebnisse nahe, dass die Rolle des fronto-parietalen Netzwerkes, welches in der Hierarchie dem Salienznetzwerk untergeordnet ist und dessen Funktion möglicherweise darin besteht, die Biassignale in räumliche Koordinaten zu übersetzen, auch von den SC übernommen werden

kann. Nichtsdestotrotz bleibt das Prinzip einer hierarchischen Verarbeitung bestehen. Da mit dem Salienznetzwerk noch eine weitere übergeordnete Ebene eingezogen wird, ist die hierarchische Organisation sogar noch deutlicher ausgeprägt, als eingangs angenommen.

In Bezug auf die Entwicklungsperspektive deuten die Ergebnisse von Experiment 3 darauf hin, dass die eben beschriebene hierarchische Organisation bei jüngeren Kindern weniger stark ausgeprägt ist. Dies zeigt sich in den vorliegenden Daten darin, dass die Siebenjährigen im Vergleich zu Erwachsenen zusätzliche Strukturen (Precuneus, postzentraler Gyrus und lateraler okzipitaler Kortex) aktivieren bzw. dass sie Strukturen, die auch von Erwachsenen rekrutiert werden, in abweichender Stärke aktivieren (ACC). Bei der geringer ausgeprägten hierarchischen Organisation handelt es sich um ein Entwicklungsprinzip, das bereits von anderen Autoren beschrieben wurde (Johnson, 2011; Supekar et al., 2009). Diese Darstellungen beziehen sich auf die Beobachtung, dass die auf Weitergabe von Top-Down-Signalen optimierte Verarbeitung von Erwachsenen bei Kindern in dieser Form noch nicht ausgeprägt zu sein scheint. Dies zeige sich darin, dass Kinder zusätzlich zu den von Erwachsenen aktivierten Strukturen häufig eine Reihe zusätzlicher Strukturen aktivieren und dass die Verarbeitung innerhalb der Hierarchie andere Gewichtungen (in Form abweichender Aktivierungen) aufweist. Wie im letzten Abschnitt angesprochen, mag hier auf neuronaler Ebene die Erklärung liegen, wieso Kindern weniger Ressourcen zur präzisen Selektion zur Verfügung stehen: Sie wenden diese Ressourcen für Aktivierungen auf, die in diesem Zusammenhang, zumindest aus der Perspektive erwachsener Hirnfunktion, nicht nötig sind.

Der Ansatz der *interaktiven Spezialisierung* (*interactive specialization*; Johnson, 2001, 2002) beschäftigt sich mit der sich anschließenden Frage, wie es zu der zunehmenden funktionellen Spezialisierung der Gehirnregionen und damit der Schärfung des hierarchischen Profils kommt. Die zunehmend spezialisierte Aktivierung ist gemäß der Sichtweise der interaktiven Spezialisierung das Resultat einer Kombination von Faktoren. Hierzu gehört erstens das selektive Pruning, also der postnatale Verlust von überschüssigen synaptischen Verbindungen (Huttenlocher, 1990; vgl. 2.9.1), zweitens die Reize, denen der Organismus (individuell) ausgesetzt ist und welche die synaptischen Gewichtungen verändern, und drittens die kompetitiven Interaktionen, die zwischen benachbarten Regionen bestehen. Daneben vermutet Johnson (2011), dass die altersbedingte Zunahme interregionaler Verknüpfungen zwischen weit auseinanderliegenden Arealen (Fair et al., 2009; Fair et al., 2007) die Ursache für die Abnahme intraregionaler Verknüpfungen darstellt. Das genauere Zusammenspiel der verschiedenen Komponenten ist jedoch noch skizzenhaft und bedarf weiterer Klärung.

In der Literatur werden auch die Vorteile einer weniger stark hierarchischen Organisation bei Kindern ins Auge gefasst. Hierarchische Netzwerke haben den Nachteil, wenig plastisch und sehr anfällig für Schäden oder Störungen zu sein (Johnson, 2011). Letzteres gilt vor allem für die Elemente der oberen Hierarchieebenen. Die weniger hierarchische Struktur der Kinder-Netzwerke hat somit den Vorteil, dass innerhalb des Netzwerkes flexibler auf Schädigungen der Verarbeitungselemente der Hierarchie (Farran & Karmiloff-Smith, 2012) oder auch auf ungewöhnlichen Input (Johnson, 2011) reagiert werden kann.

### 7.3 Bezug zu Lavies Load-Theorie

Lavie (Lavie, 1995; Lavie et al., 2004) hat mit ihrer Load-Theorie eine einflussreiche Theorie der Selektion entwickelt, die für die vorliegende Arbeit deswegen interessant ist, da sie einen Zusammenhang zwischen der Menge der Verarbeitungsressourcen und räumlicher Selektion herstellt. In dieser Theorie wird angenommen, dass Selektion auf zwei Ebenen – der perzeptuellen und der kognitiven Ebene – stattfinden kann und dass beide Ebenen in ihrer Kapazität begrenzt sind. Ausschlaggebend dafür, auf welcher Ebene die Selektion stattfindet, sind die Anforderungen, die der perzeptuelle Input an das verarbeitende System stellt. Eine hohe perzeptuelle Anforderung (perzeptuelle Load; vgl. Box 1.1) bewirkt, dass alle Ressourcen der perzeptuellen Verarbeitungsebene durch die Verarbeitung des aufgabenrelevanten Materials aufgebraucht werden und keine irrelevanten Informationen verarbeitet werden können. Die Selektion hat in diesem Fall einen automatischen Charakter und findet vollständig auf perzeptueller Ebene statt. Man spricht auch von *früher Selektion*. Bei niedriger perzeptueller Load sind hingegen ausreichend Ressourcen vorhanden, um auch irrelevante Informationen zu verarbeiten und an höhere Verarbeitungsebenen weiterzuleiten. Hier muss nun die Selektion der Informationen auf dieser höheren, der kognitiven Ebene stattfinden (*späte Selektion*). Wird diese Ebene gleichzeitig durch hohe kognitive Anforderungen (eine hohe *kognitive Load*) beansprucht, ist auch diese Ebene nicht in der Lage, die Verarbeitung der Distraktoren zu unterdrücken und es kommt zu Interferenzeffekten.

Besonders relevant für die vorliegende Untersuchung ist die Annahme der Load-Theorie, dass perzeptuelle und kognitive Verarbeitung vollständig getrennte Prozesse darstellen, d.h., dass die eine Ebene keinen Einfluss auf die Verarbeitung der jeweils anderen Ebene hat (Lavie, 2005; Macdonald & Lavie, 2008). Ist diese Annahme im Hinblick auf die vorliegenden Ergebnisse haltbar? Die in der vorliegenden Studie vorgenommenen Manipulationen – sowohl die Variation des Abstandes zwischen Zielreiz(en) und Distraktoren als auch die

Variation der Zielreizanzahl – können in Anlehnung an andere Load-Studien (z.B. Lavie et al., 2004; Linnell & Caparos, 2011) als Manipulationen der perzeptuellen Load eingeordnet werden. Es wäre somit aufgrund dieser Manipulationen mit einer Verkleinerung der Selektionsregion zu rechnen. Die Verringerung des Abstandes mag in der vorliegenden Untersuchung tatsächlich zu einer aufgabenorientierten Verkleinerung des Fokus führen, wobei hier eher angenommen wird, dass sie willentlicher Natur ist (vgl. 4.1.1). Die zweite Manipulation, die Erhöhung der Zielreizanzahl, führt in Experiment 2 jedoch zu einer Vergrößerung der Selektionsregion, einem Effekt, der bei Linnell und Caparos (2011) zunehmender *kognitiver* Load zugeschrieben wird. Anders formuliert weisen die in der vorliegenden Studie vorgenommenen Manipulationen die Eigenschaften perzeptueller Load auf, haben aber die Effekte kognitiver Load. An dieser Stelle besteht also ein Widerspruch zwischen den hier ermittelten Daten und den Annahmen der Load-Theorie. Zwei Erklärungen könnten herangezogen werden, um diesen Widerspruch zu erklären. Erstens könnte die Einordnung der Erhöhung der Zielreizanzahl als perzeptuelle Load nicht zutreffen und es sich stattdessen dabei um eine Manipulation der kognitiven Load handeln. Dies wäre kompatibel mit Ideen, die das Verfolgen von Objekten als Verarbeitungsaufgabe ähnlich dem Speichern von Objekten im visuell-räumlichen Arbeitsgedächtnis betrachten, mit dem Unterschied, dass das Verfolgen eher einen „Online-“ und das Speichern eher einen „Offline-Charakter“ der Verarbeitung hat (Alvarez & Franconeri, 2007). Eine zweite Erklärung könnte darin bestehen, dass es – entgegen der Annahmen Lavies – bei der hier verwendeten Aufgabe zu einer Interaktion der perzeptuellen und der kognitiven Ebene gekommen ist. So wäre denkbar, dass hohe perzeptuelle Load kognitive Kontrolle rekrutiert, welche wiederum die perzeptuelle Ebene so kontrolliert, dass der Effekt eines Zusammenziehens des Aufmerksamkeitsfokus auftritt. In diesem Fall würden kognitive Ressourcen aufgewendet, um perzeptuelle Ressourcen auszurichten. Eine derartige Interaktion der Ebenen konnten bereits Linnell und Caparos (2011) nachweisen. Diese zeigten, dass die perzeptuelle Ebene bei hoher perzeptueller Load kognitive Kontrolle und damit kognitive Ressourcen rekrutieren kann, welche dann wiederum die perzeptuellen Ressourcen ausrichten. Diese verhaltensbezogenen Ergebnisse sind vereinbar mit neurophysiologischen Modellen von Aufmerksamkeit, die zwischen Quell- und Zielregionen der Aufmerksamkeit unterscheiden und annehmen, dass die Ressourcen der höheren Ebene die Ausrichtung der Ressourcen der Zielebene beeinflussen (Baluch & Itti, 2011; Yantis, 2008). Auch die Ergebnisse von Experiment 3 der vorliegenden Arbeit sprechen eher für das zweite Erklärungsmodell. Sie zeigen, dass zunehmende Anforderungen durch den perzeptuellen Input mit einem Anstieg der Aktivierung im

Salienznetzwerk und im fronto-parietalen Netzwerk einhergehen, welche als neuronale Korrelate der kognitiven Ebene (im Kontrast zur perzeptuellen Ebene) betrachtet werden (Rees, 1997). Eine Reihe von empirischen Befunden sprechen somit eher für das zweite der beiden Erklärungsmodelle. Würde dieses Modell zutreffen, wäre die Annahme Lavies, die von einer klaren funktionellen Trennung der perzeptuellen und der kognitiven Ebene ausgeht, nicht haltbar. Vielmehr scheint es so, dass die Ebenen durchaus Einfluss auf die Verarbeitung der jeweils anderen Ebene haben, womit einer zentralen Annahme der Theorie von Lavie widersprochen wird. Dies legt nahe, dass sich der Mechanismus, der zu den von Lavie als frühe Selektion bezeichneten Verhaltenseffekten führt, anders gestaltet, als innerhalb der Load-Theorie beschrieben. So ist zu vermuten, dass hohe perzeptuelle Load die kognitive Ebene rekrutiert, welche eine Verkleinerung des Aufmerksamkeitsfokus veranlasst. Dass nur relevante Informationen an höhere Ebenen weitergeleitet werden, hat gemäß dieser Sichtweise nichts damit zu tun, dass alle Ressourcen auf perzeptueller Ebene aufgebraucht wären, sondern ist vielmehr auf eine Restriktion des Aufmerksamkeitsfokus infolge eines kognitiven Kontrollsignals zurückzuführen. Diese Restriktion des Aufmerksamkeitsfokus führt dazu, dass irrelevante Informationen ignoriert oder unterdrückt werden. In diesem Sinne handelt es sich bei „früher Selektion“ weniger um einen perzeptuell gesteuerten als um einen kognitiv kontrollierten Effekt. Eine hohe Auslastung der kognitiven Ebene (hohe kognitive Load) würde gemäß dieser Logik auch nicht deshalb zu Interferenzeffekten führen, weil Informationen, die auf perzeptueller Ebene nicht gefiltert werden konnten, auch hier nicht unterdrückt werden können. Vielmehr würde ein Mangel an verfügbaren kognitiven Ressourcen dazu führen, dass der Fokus der Aufmerksamkeit nicht zusammen gezogen werden kann. Die Verbindungen zwischen den Ebenen, die die Interaktion erlauben, zu konkretisieren und ggf. mit neuronalen Korrelaten in Verbindung zu bringen, ist eine wichtige Aufgabe für zukünftige Untersuchungen.

## **7.4 Alternative Erklärungsansätze: Entwicklung der Hemmung**

In der vorliegenden Arbeit wurden zur Erklärung der Entwicklung der Auflösung der Aufmerksamkeit bis hierhin vor allem Modelle herangezogen, die kognitive Entwicklung mit der Zunahme von Verarbeitungsressourcen in Verbindung bringen. Dies ist inhaltlich naheliegend, da das Zusammenziehen des Aufmerksamkeitsfokus ressourcenaufwendig zu sein scheint und im untersuchten Altersbereich eine Zunahme der Verarbeitungsressourcen beobachtet wurde. Gleichzeitig ist die Fokussierung auf Ressourcentheorien jedoch nicht zwingend. In der Entwicklungsforschung wurde im Zusammenhang mit der Entwicklung der selektiven Aufmerksamkeit ein weiterer globaler Entwicklungsfaktor vorgeschlagen, der

möglicherweise ebenfalls zur Erklärung der hier beobachteten Entwicklung herangezogen werden könnte. Es handelt sich hierbei um die Entwicklung der Fähigkeit zur Hemmung (Ridderinkhof & van der Molen, 1997; van der Molen, 2000). Unter Hemmung versteht man einen generellen kognitiven Prozess, der in Aufgaben aktiviert wird, die das Unterdrücken von Interferenzen und das Vermeiden bzw. Unterdrücken unangemessener Antworten erfordern (Aron, Robbins & Poldrack, 2004; Wager et al., 2005).<sup>22</sup> Hemmung spielt auf vielen Ebenen der Verarbeitung, von perzeptuellen bis zu motorischen Ebenen, eine Rolle und wird mit der Aktivität frontaler Regionen, insbesondere des rechten inferioren frontalen Gyrus, in Verbindung gebracht (Aron, 2007). Es hat sich in verschiedener Hinsicht gezeigt, dass sich die inhibitorische Kontrolle in der Kindheit stark verändert. So wurde gezeigt, dass Kinder beispielsweise eine geringere Fähigkeit zur Unterdrückung reflexiver Verhaltenstendenzen und eine höhere Ablenkbarkeit gegenüber Distraktoren und Lärm aufweisen (zusammenfassend siehe Fimm, 2007; van der Molen, 2000). In einer Reihe theoretischer Ansätze wurde Hemmung daher als bedeutende Dimension der kognitiven Entwicklung im Kindesalter ins Zentrum der Betrachtungen gerückt (Bjorklund & Harnishfeger, 1990; Dempster, 1993; Stuss, Shallice, Alexander & Picton, 1995).

Kommt die Entwicklung der inhibitorischen Kontrolle auch als Grundlage der Entwicklung der Auflösung der Aufmerksamkeit in Frage? Ridderinkhof und Kollegen argumentieren, dass die Entwicklung der Hemmung der zentrale Mechanismus sei, welcher der Entwicklung der selektiven Aufmerksamkeit zugrunde liege (Ridderinkhof & van der Molen, 1997; Ridderinkhof et al., 1997; Ridderinkhof & van der Stelt, 2000; van der Molen, 2000). Eine einfache Übertragung dieser Sichtweise auf die hier ermittelten Ergebnisse ist jedoch aus mehreren Gründen nicht sinnvoll. Erstens hat sich in Experiment 1 gezeigt, dass Kinder weiter entfernte Distraktoren genauso gut wie Erwachsene unterdrücken und somit die hemmenden Fähigkeiten bei Kindern unter bestimmten Bedingungen somit durchaus erwachsenenähnlich sein können. Dies macht es unwahrscheinlich, dass den beobachteten Entwicklungsveränderungen in der Auflösung der Aufmerksamkeit die Entwicklung von Hemmung per se zugrunde liegt. Zweitens zeigen die Ergebnisse von Experiment 2, dass Hemmung zumindest nicht der alleinige ausschlaggebende Faktor für die Entwicklung der Auflösung der Aufmerksamkeit sein kann. In diesem Experiment bewirkte eine Manipulation der Zielreizanzahl eine Veränderung der Größe der Selektionsregion. Dieser Effekt lässt sich

---

<sup>22</sup> Hierbei ist zu beachten, dass es sich bei Hemmung um keinen einheitlichen Prozess handelt (Kramer, Humphrey, Larish, Logan & Strayer, 1994), sondern um einen Sammelbegriff für mehrere Komponenten, die möglicherweise unterschiedliche neuronale Entsprechungen haben (z.B. Wager, Sylvester, Lacey, Nee, Franklin & Jonides, 2005).



plausibel mit einer Variation der pro Zielreiz vorhandenen Verarbeitungsressourcen erklären, eine Erklärung durch Hemmung ist an dieser Stelle wenig naheliegend. Hemmungsbezogene Effekte wären vielmehr durch eine Variation der Distraktoranzahl zu erwarten. Dies deutet darauf hin, dass Verarbeitungsressourcen im Zusammenhang mit der Auflösung der Aufmerksamkeit und ihrer Entwicklung zumindest teilweise eine Rolle spielen müssen. Drittens spielt der hemmende Prozess, den Ridderinkhof und Kollegen als Grundlage der Entwicklung der selektiven Aufmerksamkeit beschreiben, vor allem in späteren Verarbeitungsstufen, die mit der Unterdrückung von Antworten in Verbindung gebracht werden, eine Rolle (vgl. 2.6.1). Der in der vorliegenden Untersuchung verwendete Versuchsaufbau erfordert jedoch vor allem Leistung auf der perzeptuellen Ebene, die motorische Ebene bzw. Unterdrückung von Antworten spielt nur eine untergeordnete Rolle. Dies lässt Zweifel daran aufkommen, ob die Hemmung, wie sie von Ridderinkhof und Kollegen verstanden wird, auch auf das vorwiegend perzeptuelle Konstrukt der Auflösung der Aufmerksamkeit angewendet werden kann.

Die genannten Aspekte deuten darauf hin, dass die Entwicklung der inhibitorischen Kontrolle als globaler Faktor kaum zur vollständigen Erklärung der Entwicklung der Auflösung der Aufmerksamkeit herangezogen werden kann. Nichtsdestotrotz wäre es aber denkbar, dass spezifischere Aspekte von Hemmung bei Kindern anders funktionieren als bei Erwachsenen und dies zumindest teilweise zur Erklärung der sich entwickelnden Auflösung der Aufmerksamkeit beiträgt. So wäre es möglich, dass die geringere Auflösung der Aufmerksamkeit bei Kindern durch ein abweichendes Selektionsprofil zustande kommt. Bei Erwachsenen stellt sich dieses Profil als ein Center-Surround-Profil mit hemmendem Rand dar (z.B. Bahcall & Kowler, 1999; Cutzu & Tsotsos, 2003; N. G. Müller et al., 2005; Steinman et al., 1995). Es ist bisher unbekannt, welche Eigenschaften das räumliche Selektionsprofil von Kindern aufweist. So wäre es möglich, dass Kinder schwächer ausgeprägte oder gar keine hemmenden Zonen in ihrem Profil zeigen oder dass die räumliche Verteilung von verstärkenden und hemmenden Zonen sich von Erwachsenen unterscheidet. Diese Abweichungen im Aufmerksamkeitsprofil könnten durchaus erklären, warum Kinder Distraktoren speziell in der Nähe von Zielreizen weniger gut ignorieren können.

Auch wäre möglich, dass ein Mechanismus, der Hemmung mit Verarbeitungsressourcen verknüpft, an der Entwicklung der Auflösung der Aufmerksamkeit beteiligt ist. So wäre denkbar, dass die Strukturen, die an den hemmenden Aspekten des Selektionsprofils beteiligt sind, bei Kindern weniger gut entwickelt sind, und dass daher mehr Ressourcen benötigt werden, um eine mit Erwachsenen vergleichbare Hemmung zu erreichen (Ridderinkhof & van

der Molen, 1997). Somit würden sich Unterschiede in der Verarbeitungskapazität letztlich doch in der Qualität der Hemmung bemerkbar machen. Ein derartiger Mechanismus könnte prinzipiell auch den hier gewonnenen Ergebnissen zugrunde liegen, da auch bei diesem Vorschlag eine Manipulation der pro Zielreiz verfügbaren Verarbeitungskapazität zu Veränderungen in der Verarbeitung führen sollte.

Insgesamt kann der Vorschlag, dass die Veränderung von spezifischen Aspekten der inhibitorischen Kontrolle bei der Entwicklung der Auflösung der Aufmerksamkeit eine Rolle spielt, nicht komplett zurück gewiesen werden. Tatsächlich ist sogar wahrscheinlich, dass mehrere der als globale Faktoren bezeichneten Entwicklungsfaktoren (Zunahme der Verarbeitungsressourcen, Hemmung und Verarbeitungsgeschwindigkeit; Ridderinkhof & van der Molen, 1997) gemeinsam und in einem komplexen Zusammenspiel die Entwicklung der Auflösung der Aufmerksamkeit hervorbringen. Dies entspricht einer Sichtweise, die sich zunehmend innerhalb der kognitiven Entwicklungsforschung durchsetzt (de Ribeaupierre, Fagot & Lecerf, 2011; Demetriou & Mouyi, 2011). Weitere Untersuchungen sind jedoch nötig, um Klarheit darüber zu gewinnen, wie die verschiedenen Faktoren genauer zusammenspielen.

## **7.5 Bezug zur Entwicklung und zu Einschränkungen der Lesefähigkeit**

Die hier vorgestellten Ergebnisse haben möglicherweise anwendungsbezogene Bedeutung für den Erwerb der Lesefähigkeit. In der Diskussion zu Experiment 1 (vgl. 4.3.5) wurde vorgeschlagen, dass der Leseerwerb die Entwicklung der Auflösung der Aufmerksamkeit beeinflussen könnte. Umgekehrt könnte die Entwicklung der Auflösung der Aufmerksamkeit jedoch auch Auswirkungen auf den Erwerb der Lesefähigkeit haben. Neuere Forschung zeigt, dass das präzise Fokussieren der Buchstaben mit Aufmerksamkeit die Voraussetzung für erfolgreichen Leseerwerb und die Entwicklung der dem Lesen zugrunde liegenden neuronalen Schaltkreise ist (Yoncheva, Blau, Maurer & McCandliss, 2010). Die Ergebnisse der vorliegenden Studie zeigen jedoch, dass sich die Fähigkeit jüngerer Kinder, ihre Aufmerksamkeit auf kleine Regionen und damit einzelne Buchstaben auszurichten, deutlich von Erwachsenen unterscheidet. Daraus folgt, dass es sinnvoll sein kann, die Eigenschaften des Stimulusmaterials auf die Bedürfnisse und Voraussetzungen der Kinder anzupassen. Bei Kindern sind die Auswirkungen von Variationen der Eigenschaften des Lesematerials auf die Lesefähigkeit bisher jedoch kaum untersucht worden. Eine Ausnahme hiervon ist die Studie von O'Brien, Mansfield und Legge (2005), die den Effekt der Schriftgröße auf die Leseleistung von Kindern unterschiedlichen Alters untersuchten. Sie beobachteten, dass die

kleinste Schriftgröße, bei der noch schnelles und korrektes Lesen möglich ist, zwischen 6 und 10 Jahren abnimmt. Legt man die Annahme zugrunde, dass diesem Effekt eine sich verbessernde Auflösung der Aufmerksamkeit zugrunde liegt, dann deuten diese Befunde darauf hin, dass die Verarbeitung von Buchstaben eingeschränkt sein kann, wenn die Region, die dafür selektiert werden muss, zu klein ist. Zusammen mit der Studie von O'Brien et al. weisen die Ergebnisse der vorliegenden Studie darauf hin, wie wichtig es ist, Lesematerial in der angemessenen Schriftgröße anzubieten, um einen erfolgreichen Leseerwerb zu ermöglichen oder zu erleichtern.

Die hier ermittelten Ergebnisse können auch Bedeutung für das Verständnis und die Behandlung von Leseschwäche (Dyslexie) haben. Forschung zur Leseschwäche hat gezeigt, dass Dyslektiker einen stärkeren Crowding-Effekt aufweisen, der sich außerdem über eine größere Fläche ausdehnt als dies bei Nicht-Dyslektikern der Fall ist (Martelli, Di Filippo, Spinelli & Zoccolotti, 2009). Zudem zeigt eine kürzlich erschienene Studie, dass eine Vergrößerung des Abstandes zwischen den Buchstaben zu einer signifikanten Verbesserung der Leseleistung von Dyslektikern führt (Zorzi et al., 2012). In der Crowding-Forschung wird immer noch grundlegend debattiert, ob Crowding und die Auflösung der Aufmerksamkeit verwandt oder unabhängig voneinander sind (Farzin et al., 2010; Levi, 2008; vgl. 2.2.1). Träfe der Vorschlag zu, dass die Auflösung der Aufmerksamkeit die Grundlage des Crowding-Phänomens darstellt (He & Cavanagh, 1996), dann läge es nahe zu vermuten, dass dem verstärkten Crowding-Effekt von Dyslektikern eine im Vergleich zu Nicht-Dyslektikern größere Auflösung der Aufmerksamkeit zugrunde liegt. Dieser Vorschlag wurde bisher nicht direkt getestet; eine Reihe von Studien haben aber gezeigt, dass Dyslektiker Defizite in einer Reihe anderer Aspekte visueller selektiver Aufmerksamkeit aufweisen (Bosse, Tainturier & Valdois, 2007; Facoetti et al., 2003) und dass ein (wenn auch eher generelles) Aufmerksamkeitstraining die Erfolge einer darauf aufbauenden Schreibförderung vergrößern kann (Chenault, Thomson, Abbott & Berninger, 2006). Falls Dyslektiker tatsächlich eine verringerte Auflösung der Aufmerksamkeit aufweisen (wie es die von Martelli et al. gemessene größere Ausdehnung der Crowding-Region nahelegt), wäre es möglicherweise sinnvoll, das generelle Aufmerksamkeitstraining durch ein gezieltes Training, welches sich speziell das Zusammenziehen des Aufmerksamkeitsfokus bezieht, zu ersetzen. Eine leicht zu implementierende Variante wären hier Action-Computerspiele, die schon nach kurzem Training die räumliche Verteilung der visuellen Aufmerksamkeit so verändern, dass eng positionierte Objekte besser verarbeitet werden können (C. S. Green & Bavelier, 2006, 2007). Ähnliche Effekte scheinen auch durch Meditation hervorgerufen zu werden (Jha, Krompinger

& Baime, 2007; Slagter et al., 2007), sodass es sich auch hierbei um ein effektives Training für das Zusammenziehen des Aufmerksamkeitsfokus handeln könnte. Basierend auf dem Befund, dass die Auflösung der Aufmerksamkeit und ihre Entwicklung im Zusammenhang mit der Verarbeitungskapazität stehen, könnte auch ein Training der Arbeitsgedächtniskapazität dazu beitragen, dass der Fokus der Aufmerksamkeit enger zusammengezogen und damit letztendlich die Leseleistung verbessert werden kann. Die bisher entwickelten Trainings zur Steigerung der Arbeitsgedächtniskapazität, die vor allem am PC durchgeführt werden, sind zurzeit jedoch höchst umstritten (Melby-Lervag & Hulme, 2013; Shipstead, Redick & Engle, 2012; T. W. Thompson et al., 2013). Die Kritik bezieht sich vor allem darauf, dass die Trainings nicht nachhaltig seien und Transfereffekte über das direkt Trainierte hinaus kaum zu beobachten seien. Effektiver scheinen hingegen Programme, die das häusliche Umfeld einbeziehen und zusätzlich ein generelles Verhaltenstraining integrieren (Burger, 2010). Dieses prinzipielle Vorgehen wurde von Neville et al. (2013) mit einem Training selektiver Aufmerksamkeit kombiniert, welches möglicherweise auch positive Effekte auf die Auflösung der Aufmerksamkeit und in der Konsequenz den Leseerwerb haben könnte. Weitere Forschung ist nötig, um die verschiedenen Vorschläge auf ihre Wirksamkeit zu testen.

## 7.6 Schlussfolgerung

Die vorliegende Arbeit zeigt, dass die Auflösung der Aufmerksamkeit zwischen 7 Jahren und dem Erwachsenenalter eine bedeutsame Entwicklungsveränderung durchläuft. Sie deutet zudem darauf hin, dass diese Entwicklung durch einen Zuwachs der Verarbeitungsressourcen in diesem Alterszeitraum bedingt ist. Dieser Zuwachs an Ressourcen erlaubt es Kindern, den Aufmerksamkeitsfokus zunehmend enger zusammenzuziehen.

Auf neuronaler Ebene geht das Zusammenziehen des Aufmerksamkeitsfokus in allen Altersgruppen mit einem Anstieg der Aktivität im Salienznetzwerk aus FIC und ACC und mit einer erhöhten Aktivierung der SC als Teil des fronto-parietalen Netzwerkes einher. Die erhöhte Aktivierung dieser beiden Netzwerke kann als erhöhter Verbrauch kognitiver Ressourcen interpretiert werden – ein Beleg für den auf Verhaltensebene ermittelten Befund, dass das Zusammenziehen des Fokus der Aufmerksamkeit ressourcenaufwendig ist. Es scheint somit, als würde eine hohe perzeptuelle Anforderung kognitive Ressourcen rekrutieren, welche dann wiederum die perzeptuellen Ressourcen ausrichten.

Dass die eben beschriebenen Netzwerke bzw. Netzwerkteile bereits von Siebenjährigen aktiviert werden, zeigt, dass Kinder zumindest prinzipiell in gleichem Maße wie Erwachsene

kognitive Ressourcen mobilisieren können, um den Aufmerksamkeitsfokus zusammenziehen. Die gleichzeitig geringere Performanz der Kinder deutet jedoch darauf hin, dass die im Salienznetzwerk generierten Signale bei Kindern nicht den gleichen Effekt wie bei Erwachsenen erzielen. Hier scheint es bei den jüngeren und älteren Kindern unterschiedliche Wirkmechanismen zu geben. Für die jüngeren Kinder könnte sich die geringere Leistung bei gleicher (oder teilweise sogar stärkerer) Aktivierung der Kontrollregionen daraus ergeben, dass die im Salienznetzwerk generierten Kontrollsignale nicht ausschließlich an solche Areale weitergeleitet werden, die auch von Erwachsenen beim Zusammenziehen des Aufmerksamkeitsfokus aktiviert werden. Stattdessen rufen die Biassignale aus den kontrollierenden Netzwerken bei den Kindern auch Aktivität in – im Vergleich zu Erwachsenen – zusätzlichen Arealen hervor. Hier mag auf neuronaler Ebene die Erklärung dafür liegen, dass Kindern weniger Ressourcen zur präzisen Selektion zur Verfügung stehen: Sie wenden die vorhandenen Ressourcen für zusätzliche Aktivierungen auf und in der Folge fehlen die Ressourcen möglicherweise dort, wo sie für optimale Leistung benötigt würden.

Das neuronale Aktivierungsmuster der älteren Kinder ist hingegen dadurch charakterisiert, dass sie in einigen der von den Siebenjährigen zusätzlich aktivierten Areale Aktivierungsstärken unter dem Erwachseneniveau aufweisen. Hier scheint es, als würde die im mittleren Kindesalter gezeigte höhere Aktivierung in diesen Arealen durch ein Einsparen der Aktivierung „überkompensiert“ werden. Dies erweckt den Eindruck, als müsse sich das optimale Niveau der Aktivierung erst einpendeln. Sowohl bei den jüngeren als auch bei den älteren Kindern sprechen die kombinierten Ergebnisse der Verhaltens- und der fMRT-Untersuchung für Entwicklungstheorien gemäß denen die kognitive Entwicklung darauf beruht, dass bei prinzipiell gleichbleibender Verarbeitungskapazität die Menge der verfügbaren Ressourcen zunimmt. Es ist zu vermuten, dass die Zunahme der verfügbaren Verarbeitungsressourcen ihre Wirkung auf die Entwicklung der Auflösung der Aufmerksamkeit im komplexen Zusammenspiel mit der Verbesserung anderer Faktoren wie inhibitorischer Kontrolle oder Verarbeitungsgeschwindigkeit entfaltet. Dieses Zusammenspiel genauer zu verstehen, stellt eine Aufgabe für die Zukunft dar.

## **8 Ausblick**

Die vorliegende Arbeit zielte darauf ab, die Entwicklung der Auflösung der Aufmerksamkeit über das Kindesalter hinweg bis hinein in das Jugendalter zu beschreiben und Informationen über mögliche zugrunde liegende Bedingungen dieser Entwicklung zu gewinnen. Aus den vorgestellten Ergebnissen lassen sich weitere Fragestellungen ableiten, die in den hier vorgestellten Studien nicht hinreichend untersucht werden konnten. Dabei handelt es sich einerseits um grundlegende Fragen, die das Verständnis der hier gesammelten Daten weiter verbessern können (8.1 und 8.2). Andererseits handelt es sich dabei um weiterführende Fragen, die auf den hier vorgestellten Untersuchungen aufbauen (8.3 bis 8.5). Beide Fragenkomplexe sollen im Folgenden vorgestellt werden.

### **8.1 Charakterisierung des räumlichen Profils des Aufmerksamkeitsfokus bei Kindern**

Um die Ergebnisse der vorliegenden Untersuchung eindeutiger interpretieren zu können, wäre es hilfreich, Informationen über das räumliche Profil des Aufmerksamkeitsfokus bei Kindern und über dessen Entwicklung zur Verfügung zu haben. Der Aufmerksamkeitsfokus zeichnet sich durch verschiedene Eigenschaften wie Größe oder die räumliche Verteilung von verstärkenden und hemmenden Regionen aus (z.B. Cheal, Lyon & Gottlob, 1994; LaBerge & Brown, 1989). So wurde in der Erwachsenenforschung festgestellt, dass das räumliche Profil der Aufmerksamkeit in vielen Fällen einem mexikanischen Hut gleicht, d.h., dass es aus einer verstärkenden Region im Zentrum besteht, deren Effekt nach außen hin schwächer wird und die von einem hemmenden Rand umgeben ist (N. G. Müller et al., 2005). Der hemmende Rand scheint jedoch nur dann aufzutreten, wenn das Stimulusmaterial hohe Anforderungen an das visuelle System stellt (Doshier & Lu, 2000; Kraft et al., 2007; Palmer & Moore, 2009). Bei Kindern stehen genauere Charakterisierungen der Selektionsregion noch aus. Bisherige Entwicklungsstudien, einschließlich der vorliegenden, beschäftigen sich ausschließlich mit der Größe des Aufmerksamkeitsfokus. Doch weist die Selektionsregion von Kindern auch einen hemmenden Rand auf und wie sind verstärkende und hemmende Regionen räumlich verteilt? Ist die Gewichtung, die bei der Selektion stattfindet, bei Kindern ähnlich stark ist wie bei Erwachsenen? Es wäre denkbar, dass sowohl Verstärkung als auch Hemmung bei Kindern schwächer ausfallen, dass also die Gewichtung des perzeptuellen Inputs durch Aufmerksamkeit bei Kindern allgemein geringer ist. Alternativ wäre auch möglich, dass nur eine der beiden Komponenten, also entweder Verstärkung oder Hemmung, schwächer ausfallen. Dies wäre vereinbar mit der Sichtweise, dass hemmende und verstärkende Prozesse

nicht aneinander gekoppelt, sondern trennbare Prozesse sind (Slotnick et al., 2003). Eine Möglichkeit zur Ermittlung des Aufmerksamkeitsprofils wäre die Darbietung von Proben in einem Paradigma zur visuellen Suche, wobei diese Proben in unterschiedlichem Abstand vom Zielreiz zu präsentieren wären. Aus der Güte der Probendetektion in Abhängigkeit vom Abstand zum Zielreiz könnte ein räumliches Aufmerksamkeitsprofil abgeleitet werden (vgl. Hopf et al., 2010). Dieses Profil kann daraufhin untersucht werden, ob es verstärkende und hemmende Regionen aufweist, wie stark diese ausgeprägt sind und wo sich ggf. die Extremstellen des Profils befinden. Von besonderem Interesse wäre hier das Minimum der Funktion, das als Index für die Breite der Selektionsregion verwendet werden kann (Caparos & Linnell, 2010). In Anlehnung an die hier beobachteten Ergebnisse ist zu vermuten, dass sich das Minimum von Kindern, falls sie denn ein erkennbares Minimum aufweisen, weiter vom Zentrum der Selektion entfernt befindet, als dies bei Erwachsenen der Fall ist. Die absolute Größe der Extremwerte der verschiedenen Altersstufen könnte zudem Aufschluss darüber geben, ob Kinder unter Aufmerksamkeit eine mit Erwachsenen vergleichbare Gewichtung des visuellen Feldes zeigen. Speziell im Hinblick auf die inhibitorischen Anteile des Aufmerksamkeitsprofils beobachteten McCarley, Mounts und Kramer (2004), dass ältere Versuchspersonen benachbarte Zielreize schwächer hemmen, als dies bei jungen Erwachsenen der Fall ist. Im Sinne eines U-förmigen Entwicklungsverlaufs, der sich in vielen kognitiven Fähigkeiten zeigt (z.B. Zelazo, 2004), wäre zu erwarten, dass auch Kinder eine geringere Hemmung in unmittelbarer Nähe der Zielreize aufweisen. Weiterführend könnte durch eine Manipulation der visuellen Anforderungen der jeweiligen Aufgaben (z.B. durch eine Herabsetzung des Kontrastes, mit dem die Stimuli dargeboten werden) die Frage aufgegriffen werden, ob Kinder die hemmenden Aspekte der Selektion aufgrund derselben Bedingungen wie Erwachsene aufbauen (Kraft et al., 2007). Allgemeiner könnten die Ergebnisse dieser Experimente Aufschluss darüber geben, inwieweit in eine Erklärung der Entwicklung der Auflösung der Aufmerksamkeit neben Ressourcen auch Inhibitionseffekte integriert werden müssen.

Von Interesse wäre in diesem Zusammenhang auch, ob sich die Eigenschaften des Aufmerksamkeitsprofils bei Kindern unterschiedlichen Alters infolge visueller Stimulation in derselben Geschwindigkeit wie bei Erwachsenen aufbauen oder ob Kinder länger brauchen, um ein adäquates Aufmerksamkeitsprofil aufzubauen (vgl. Heitz & Engle, 2007). Aufgrund einer prinzipiell geringeren Verarbeitungsgeschwindigkeit von Kindern (Kail, 1991) wäre hier eine langsamere Herstellung des Aufmerksamkeitsprofils zu erwarten.

## 8.2 MOT bei Kindern: seriell oder parallel?

Zukünftige Forschung sollte sich ebenfalls mit der Frage auseinandersetzen, wie Kinder das Verfolgen mehrerer Objekte bewerkstelligen. Hier wäre zunächst zu klären, ob Kinder in der Lage sind, ihren Fokus der Aufmerksamkeit dauerhaft zu teilen und mehrere Selektionsregionen zu unterhalten. Diese Fähigkeit wurde für Erwachsene bereits nachgewiesen (Awh & Pashler, 2000; Kramer & Hahn, 1995; M. M. Müller, Malinowski, Gruber & Hillyard, 2003). Die dabei zur Anwendung gebrachten Versuchsanordnungen könnten, entsprechend angepasst, auch für Kinder verwendet werden. Soweit sich herausstellt, dass auch Kinder den Fokus der Aufmerksamkeit dauerhaft teilen können, stellt sich die weiterführende Frage, ob Kinder diese Fähigkeit auch in der MOT-Aufgabe einsetzen oder ob sie seriell zwischen den Zielreizen wechseln, um deren Repräsentationen aufzufrischen. Ob beim MOT die Zielreize parallel mit mehreren Selektionsregionen verfolgt werden oder die Positionen der Zielreize nacheinander aktualisiert werden, ist auch bei Erwachsenen noch strittig (Cavanagh & Alvarez, 2005; Holcombe & Chen, 2012; VanRullen, Carlson & Cavanagh, 2007). Neuere experimentelle Entwicklungen sind jedoch zunehmend besser in der Lage, den Mechanismus des Tracking mehrerer Objekte und die Rate, mit der die Repräsentationen aktualisiert werden, zu bestimmen (d'Avossa, Shulman, Snyder & Corbetta, 2006; Howe, Cohen, Pinto & Horowitz, 2010). Angewendet auf Kinder ließe sich mit diesen Versuchsanordnungen untersuchen, ob Kinder erstens denselben Mechanismus beim Verfolgen mehrerer Objekte verwenden und ob sie zweitens, im Falle serieller oder teilweise serieller Verarbeitung, die gleiche Geschwindigkeit beim Auffrischen der einzelnen Objekte aufweisen. Erkenntnisse in dieser Hinsicht hätten bedeutende Auswirkungen auf die Interpretation der vorliegenden Ergebnisse. Hier wurde von einem multifokalen Modell ausgegangen, dessen einzelne Selektionsregionen in Abhängigkeit von den pro Objekt verfügbaren Ressourcen mehr oder weniger klein zusammen gezogen werden können. Bei einem seriellen Modell würden die vorliegenden Daten aber vielmehr die Größe einer einzigen Selektionsregion beschreiben. In diesem Fall wären Effekte der verfügbaren Ressourcen eher zeitlichen Faktoren wie der Geschwindigkeit, mit der die Positionen der einzelnen Zielreize aktualisiert werden, zuzuschreiben. Zudem würde in dem Prozess eine Speicherkomponente ein größeres Gewicht bekommen. Der Mechanismus zur Aufrechterhaltung mehrerer Selektionsregionen würde dann dem von Barrouillet (Barrouillet et al., 2004) in seinem TBRS-Modell (vgl. 5.3.6) vorgeschlagenen Mechanismus ähneln. Um Überschneidungen der beiden Mechanismen und ihrer Entwicklung zu untersuchen, könnten mit einem Individual-Differences-Zugang (z.B. Shah & Miyake, 1996) die Leistungen in



einer MOT-Aufgabe und einer typischen TBRS-Aufgabe auf korrelative Zusammenhänge untersucht werden.

### **8.3 Weitergehende Charakterisierung der Entwicklung der Auflösung der Aufmerksamkeit**

Die Entwicklung der Auflösung der Aufmerksamkeit wurde in der vorliegenden Untersuchung mit einem dynamischen Versuchsaufbau untersucht. Zur Generalisierung der Ergebnisse wäre es wünschenswert, die Befunde auf einen statischen Versuchsaufbau auszuweiten, wie er beispielsweise in der Attentional-Walk-Aufgabe (Intriligator & Cavanagh, 2001) oder der Zählaufgabe (Jevons, 1871) verwendet wird. Um die Ergebnisse der vorliegenden Untersuchung auf ein solideres Fundament zu stellen, wäre es ebenfalls hilfreich, die Dauer der Trackingphase zu variieren, um sicherzustellen, dass der beobachtete Effekt ein Charakteristikum des Aufmerksamkeitsfokus ist und, vor allem bei den Kindern, nicht zeitlich-motivationalen Faktoren zugeschrieben werden muss.

Auf der Grundlage einer Generalisierung der Ergebnisse wäre es lohnenswert herauszufinden, ob die Entwicklung der Auflösung der Aufmerksamkeit sich auch auf andere Dimensionen als die räumliche übertragen lässt. So wäre einmal die Untersuchung der Entwicklung der Auflösung der eigenschaftsbasierten Aufmerksamkeit in unterschiedlichen visuellen Eigenschaftsräumen wie Farbe, Orientierung oder Form interessant. Zur Untersuchung dieser Fragestellung könnten zufällig im Raum verteilte Kreise, die auf Basis identischer Eigenschaften (z.B. identischen Farben) Untergruppen bilden, dargeboten werden. Durch die zufällige Anordnung der Kreise verliert der Faktor Raum an Bedeutung (vgl. Andersen, Müller & Hillyard, 2009; Halberda, Sires & Feigenson, 2006). Nun könnte eine Farbe als zu verfolgende Farbe markiert werden. Im Anschluss würden alle Farben – einschließlich der markierten – beginnen, sich unabhängig voneinander durch den Farbraum zu bewegen (vgl. Blaser, Pylyshyn & Holcombe, 2000). Die Probanden hätten die Aufgabe die Farbe durch den Farbraum zu verfolgen und abschließend anzugeben, welche Farbe sich aus der ursprünglich markierten Farbe ergeben hat. Zur Untersuchung der Auflösung der eigenschaftsbasierten Aufmerksamkeit könnte nun der Abstand im Eigenschaftsraum variiert werden, mit dem sich die anderen Farben der markierten Farbe nähern können.

Die Untersuchung anderer Dimensionen könnte auch auf die zeitliche ausgeweitet werden. Selektion ist nicht nur räumlich begrenzt, sondern die Selektion und Individuation von Ereignissen in einem schnellen Strom von Ereignissen hat auch eine sehr grobe zeitliche Auflösung (Cavanagh, 2004). So können Lichtsignale nur dann als diskrete Signale erkannt

werden, wenn sie höchstens mit einer Frequenz von 4-8 Hz dargeboten werden (Verstraten, Cavanagh & Labianca, 2000). Im Sinne einer umfassenden Charakterisierung der Auflösung der Aufmerksamkeit sollte auch die zeitliche Auflösung der Aufmerksamkeit untersucht werden. Ebenfalls wäre eine Ausweitung auf andere Modalitäten möglich. Ähnlichkeiten der Veränderungen in den unterschiedlichen Dimensionen erlauben eine Generalisierung des in der vorliegenden Arbeit gewonnen Befundes und führen zu der nächsten vielversprechenden Fragestellung, ob die Veränderungsprozesse der Auflösung der Aufmerksamkeit in den verschiedenen Dimensionen auf einen gemeinsamen zugrunde liegenden Mechanismus zurückgeführt werden können.

#### **8.4 Präzisierung der neurokognitiven Mechanismen der Auflösung der Aufmerksamkeit**

Die Interpretation der vorliegenden fMRT-Daten enthielt einige Annahmen, die auf Befunden hinsichtlich des Zusammenspiels der Regionen und Netzwerke in anderen Zusammenhängen und Aufgaben basieren (z.B. Seeley et al., 2007; Supekar & Menon, 2012; Supekar et al., 2009; Uddin et al., 2011). Zum genaueren Verständnis der Funktionen der einzelnen hier aktivierten Regionen und deren Zusammenwirken speziell im Zusammenhang mit der Auflösung der Aufmerksamkeit wäre es wünschenswert, die funktionellen Daten, die während des Object-Trackings mit variierenden Zielreiz-Distraktor-Abständen (oder anderen Paradigmen, die Ähnliches messen, z.B. Hopf, 2006) gewonnen werden, mit Analyseverfahren auszuwerten, die die funktionellen Verknüpfungen zwischen den Arealen darstellen können. Hierzu wäre es hilfreich, die funktionelle und möglichst auch effektive Konnektivität der beteiligten Areale näher zu untersuchen. Hieraus können Informationen über das Zusammenspiel der Regionen und kausale oder hierarchische Beziehungen zwischen den Arealen abgeleitet werden und damit geklärt werden, wie Quell- und Zielregionen der Aufmerksamkeit zusammenspielen, um eine präzise Selektion zu ermöglichen. Graphentheoretische Netzwerkanalysen könnten zudem Aufschluss über die relative Bedeutung der Strukturen innerhalb des Netzwerkes geben.

Unter einer Entwicklungsperspektive könnte der Einsatz von Konnektivitäts- und graphentheoretischen Analysen Hinweise darauf liefern, ob und inwiefern sich das Zusammenwirken der Regionen beim Zusammenziehen des Aufmerksamkeitsfokus bei Kindern von dem von Erwachsenen unterscheidet. Hiermit könnte möglicherweise eine Antwort auf die Frage geliefert werden, warum sich bei räumlich präziser Selektion die Aktivierung in Quellregionen der Aufmerksamkeit zwischen den Altersgruppen kaum unterscheidet, es aber effektiv eine geringe Leistung der Kinder gibt. Speziell bei den Kindern

könnte eine parallele Untersuchung der strukturellen Konnektivität mit DTI aufschlussreich sein. Mit dieser Methode könnte untersucht werden, wie sich die strukturellen Verknüpfungen zwischen den für die Auflösung der Aufmerksamkeit relevanten Arealen verändern. Die Berechnung von Korrelationen zwischen funktioneller bzw. effektiver und struktureller Konnektivität könnte zudem Aufschluss darüber geben, inwieweit die funktionellen Unterschiede auf strukturellen Entwicklungen beruhen.

### **8.5 Neurokognitive Korrelate einer Variation der Anzahl der Objekte bei gleichzeitiger Variation des Abstandes**

Eine lohnenswerte weiterführende Frage könnte zudem darin bestehen, wie sich die Variation der Anzahl der Objekte bei gleichzeitiger Variation des Zielreiz-Distraktor-Abstandes auf neuronaler Ebene auswirkt. In der vorliegenden Untersuchung hat sich gezeigt, dass zunehmende Anforderungen an die Präzision der Selektion mit einem Anstieg der Aktivierung im Salienznetzwerk und Teilen des fronto-parietalen Aufmerksamkeitsnetzwerkes einhergehen. Ein Anstieg der zu repräsentierenden Menge an Informationen wurde seinerseits in einer Reihe von Studien mit einem Anstieg der Aktivierung im PPC, insbesondere im PIPS, in Verbindung gebracht (Todd & Marois, 2004; Xu & Chun, 2006). Diese Sichtweise wurde kürzlich um den Befund erweitert, dass die Menge der Objekte, die im PPC gespeichert werden kann, keine passive Gegebenheit, sondern vielmehr von der Aktivität des DLPFC abhängig ist. Kontrollsignale von dort scheinen in der Lage, die Kapazität des PPC zu erhöhen (Edin et al., 2009). Crottaz-Herbette und Menon (2006) zeigten wiederum, dass der DLPFC von den Komponenten des Salienznetzwerkes moduliert wird bzw. werden kann. Salienznetzwerk, IPS und DLPFC scheinen also in einem komplexen Zusammenspiel zu arbeiten, das sicher noch nicht ganz verstanden ist. Eine orthogonale Manipulation des Abstandes und der Load im Tracking-Experiment und eine damit verbunden möglicherweise zu beobachtende Dissoziation der Aktivierungen, die auf die Anzahl der Objekte und die Variation des Abstandes zurückzuführen sind, könnte in verschiedener Hinsicht einen Erkenntnisgewinn bringen. Zunächst einmal würde es ermöglichen, die Rolle des Salienznetzwerkes und des fronto-parietalen Netzwerkes weiter zu differenzieren und somit auch eine Ausdifferenzierung des bis hierhin einheitlich verwendeten Begriffs der kognitiven Ressourcen erlauben. Die Betrachtung funktioneller und vor allem effektiver Konnektivität in Kombination mit graphentheoretischen Auswertungsmethoden würde es darüber hinaus ermöglichen, die Interaktionen und deren Kausalität innerhalb und zwischen den Netzwerken festzustellen. Durch eine Anwendung desselben Versuchsaufbaus auf Kinder ließe sich herausfinden, ob eine ähnliche Dissoziation

---

der Netzwerke und deren Ressourcen schon im Kindesalter besteht oder ob sich die Beziehungen innerhalb und zwischen den Netzwerken von denen von Erwachsenen unterscheiden.

## Abstract

The ability to select relevant information from the environment is limited by the resolution of attention – i.e., by the minimum size of the region that can be selected by attention. Contrary to many other aspects of attention, the development of this limit has not been investigated in children so far. The aim of this dissertation is to investigate both the development of attentional resolution during school age and the mechanisms underlying this development.

We addressed this question in two behavioral experiments and one functional magnetic resonance imaging (fMRI) experiment. In those experiments, subjects of different age groups performed an object tracking task with varying distances between target(s) and distractors. In experiment 1, absolute thresholds – corresponding to the resolution of attention – were determined for 7-, 9- and 11-year-old children, 13-year-old adolescents and an adult sample. A comparison of the thresholds revealed that the resolution of attention develops markedly between childhood and adulthood. Experiment 2 tested the hypotheses that this development can be attributed to an age-related increase in processing resources by varying the number of targets in addition to target-distractor distance. Increasing the number of targets lead to an increase in the absolute threshold across all age groups. However, this increase was especially pronounced in those age groups that had been characterized by a low resolution of attention in Experiment 1. This indicates that the lower attentional resolution of the younger age groups may be related to a lack of an adequate amount of processing resources which restrains them from constricting the focus of attention in an adult-like manner. In Experiment 3, fMRI was performed in children aged 7 years, 11 years, and in young adults to investigate the neural mechanisms underlying the resolution of attention. Increasing the required resolution of attention led to activation increases in fronto-insular cortex, medial frontal cortex including anterior cingulate cortex (ACC) and supplementary motor area, and superior colliculi and thalamus. This circuitry was recruited by all age groups, but ACC showed an age-related activation reduction. Moreover, several non-task-specific areas showed additional activation in the 7-year-olds and decreased activation in the 11-year-olds as compared to the adult sample. Our results suggest that age-related improvements in the resolution of attention are characterized by an increased use of more functionally specialized brain regions during the course of development.

In sum, the present results link the marked development of the resolution of attention to an age-related increase in processing resources. On a neurophysiological level, our findings highlight a role of the saliency network in the context of the resolution of attention. From a developmental perspective, the present results establish that children make use of these

---

circuits from an early age. At the same time, however, children show an increasingly specialized use of these brain regions possibly resulting in the increase in processing resources observed at the behavioral level.

## Literaturverzeichnis

- Adams, R. J. & Courage, M. L. (2002). Using a single test to measure human contrast sensitivity from early childhood to maturity. *Vision Research*, 42, 1205-1210.
- Aguirre, G. K., Zarahn, E. & D'Esposito, M. (1998). The variability of human, BOLD hemodynamic responses. *Neuroimage*, 8, 360-369.
- Ahmed, L. & de Fockert, J. W. (2012). Focusing on attention: The effects of working memory capacity and load on selective attention. *PLOS One*, 7, e43101.
- Akhtar, N. & Enns, J. T. (1989). Relations between covert orienting and filtering in the development of visual attention. *Journal of Experimental Child Psychology*, 48, 315-334.
- Alloway, T. P., Gathercole, S. E. & Pickering, S. J. (2006). Verbal and visuospatial short-term and working memory in children: Are they separable? *Child Development*, 77, 1698-1716.
- Allport, D. A., Antonis, B. & Reynolds, P. (1972). On the division of attention: A disproof of the single channel hypothesis. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 24, 225-235.
- Alvarez, G. A. & Franconeri, S. L. (2007). How many objects can you track? Evidence for a resource-limited attentive tracking mechanism. *Journal of Vision*, 7, 1-10.
- Andersen, S. K., Müller, M. M. & Hillyard, S. A. (2009). Color-selective attention need not be mediated by spatial attention. *Journal of Vision*, 9, 1-7.
- Andrews, G. & Halford, G. S. (2002). A cognitive complexity metric applied to cognitive development. *Cognitive Psychology*, 45, 153-219.
- Anton-Erxleben, K. & Carrasco, M. (2013). Attentional enhancement of spatial resolution: Linking behavioural and neurophysiological evidence. *Nature Reviews Neuroscience*, 14, 188-200.
- Anton-Erxleben, K., Stephan, V. M. & Treue, S. (2009). Attention reshapes center-surround receptive field structure in macaque cortical area MT. *Cerebral Cortex*, 19, 2466-2478.
- Armstrong, K. M., Chang, M. H. & Moore, T. (2009). Selection and maintenance of spatial information by frontal eye field neurons. *Journal of Neuroscience*, 29, 15621-15629.
- Armstrong, K. M., Fitzgerald, J. K. & Moore, T. (2006). Changes in visual receptive fields with microstimulation of frontal cortex. *Neuron*, 50, 791-798.
- Armstrong, V., Maurer, D. & Lewis, T. L. (2009). Sensitivity to first- and second-order motion and form in children and adults. *Vision Research*, 49, 2774-2781.
- Aron, A. R. (2007). The neural basis of inhibition in cognitive control. *Neuroscientist*, 13, 214-228.
- Aron, A. R., Robbins, T. W. & Poldrack, R. A. (2004). Inhibition and the right inferior frontal cortex. *Trends in Cognitive Sciences*, 8, 170-177.
- Astle, D. E. & Scerif, G. (2011). Interactions between attention and visual short-term memory (VSTM): What can be learnt from individual and developmental differences? *Neuropsychologia*, 49, 1435-1445.
- Atkinson, J. (2000). *The developing visual brain*. Oxford: Oxford University Press.
- Atkinson, R. C. & Shiffrin, R. M. (1968). Human memory: A proposed system and its control processes. In K. W. Spence & J. T. Spence (Eds.), *The psychology of learning and motivation* (pp. 89-195). New York, NY: Academic Press.
- Attwell, D. & Laughlin, S. B. (2001). An energy budget for signaling in the grey matter of the brain. *Journal of Cerebral Blood Flow and Metabolism*, 21, 1133-1145.

- Awh, E., Armstrong, K. M. & Moore, T. (2006). Visual and oculomotor selection: Links, causes and implications for spatial attention. *Trends in Cognitive Sciences*, 10, 124-130.
- Awh, E., Jonides, J. & Reuter-Lorenz, P. A. (1998). Rehearsal in spatial working memory. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 24, 780-790.
- Awh, E. & Pashler, H. (2000). Evidence for split attentional foci. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 26, 834-846.
- Awh, E., Vogel, E. & Oh, S. (2006). Interactions between attention and working memory. *Neuroscience*, 139, 201-208.
- Baddeley, A. D. & Hitch, G. J. (1974). Working memory. In G. H. Bower (Ed.), *The psychology of learning and motivation* (pp. 47-90). San Diego, CA: Academic Press.
- Bahcall, D. O. & Kowler, E. (1999). Attentional interference at small spatial separations. *Vision Research*, 39, 71-86.
- Bahrami, B. (2003). Object property encoding and change blindness in multiple object tracking. *Visual Cognition*, 10, 949-963.
- Baluch, F. & Itti, L. (2011). Mechanisms of top-down attention. *Trends in Neurosciences*, 34, 210-224.
- Barnea-Goraly, N. (2005). White matter development during childhood and adolescence: A cross-sectional diffusion tensor imaging study. *Cerebral Cortex*, 15, 1848-1854.
- Barrouillet, P., Bernardin, S. & Camos, V. (2004). Time constraints and resource sharing in adults' working memory spans. *Journal of Experimental Psychology: General*, 133, 83-100.
- Barrouillet, P., Bernardin, S., Portrat, S., Vergauwe, E. & Camos, V. (2007). Time and cognitive load in working memory. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 33, 570-585.
- Barrouillet, P. & Camos, V. (2007). The time-based resource-sharing model of working memory. In N. Osaka, R. Logie & M. D'Esposito (Eds.), *Working memory: Behavioral and neural correlates* (pp. 59-80). Oxford: Oxford University Press.
- Barrouillet, P. & Gaillard, V. (2011a). Introduction: From neo-Piagetian theories to working memory development studies. In P. Barrouillet & V. Gaillard (Eds.), *Cognitive development and working memory: A dialogue between neo-Piagetian and cognitive approaches* (pp. 1-10). Hove: Psychology Press.
- Barrouillet, P. & Gaillard, V. (Eds.). (2011b). *Cognitive development and working memory: A dialogue between neo-Piagetian and cognitive approaches*. Hove: Psychology Press.
- Barrouillet, P., Gavens, N., Vergauwe, E., Gaillard, V. & Camos, V. (2009). Working memory span development: A time-based resource-sharing model account. *Developmental Psychology*, 45, 477-490.
- Beaton, E. A., Stoddard, J., Lai, S., Lackey, J., Shi, J., Ross, J. L. et al. (2010). Atypical functional brain activation during a multiple object tracking task in girls with Turner syndrome: Neurocorrelates of reduced spatiotemporal resolution. *American Journal on Intellectual and Developmental Disabilities*, 115, 140-156.
- Beck, D. M. & Kastner, S. (2009). Top-down and bottom-up mechanisms in biasing competition in the human brain. *Vision Research*, 49, 1154-1165.
- Benso, F., Turatto, M., Mascetti, G. G. & Umiltà, C. (1998). The time course of attentional focusing. *European Journal of Cognitive Psychology*, 10, 373-388.



- Bertone, A., Hanck, J., Cornish, K. M. & Faubert, J. (2008). Development of static and dynamic perception for luminance-defined and texture-defined information. *Neuroreport*, 19, 225-228.
- Bettencourt, K. C. & Somers, D. C. (2009). Effects of target enhancement and distractor suppression on multiple object tracking capacity. *Journal of Vision*, 9, 1-11.
- Bisley, J. W. (2011). The neural basis of visual attention. *Journal of Physiology*, 589, 49-57.
- Bisley, J. W. & Goldberg, M. E. (2010). Attention, intention, and priority in the parietal lobe. *Annual Review of Neuroscience*, 33, 1-21.
- Biswal, B. B. (2012). Resting state fMRI: A personal history. *Neuroimage*, 62, 938-944.
- Bjorklund, D. F. & Harnishfeger, K. K. (1990). The resources construct in cognitive development: Diverse sources of evidence and a theory of inefficient inhibition. *Developmental Review*, 10, 48-71.
- Blakemore, S. J. (2008). The social brain in adolescence. *Nature Reviews Neuroscience*, 9, 267-277.
- Blanke, O., Brooks, A., Mercier, M., Spinelli, L., Adriani, M., Lavanchy, L. et al. (2007). Distinct mechanisms of form-from-motion perception in human extrastriate cortex. *Neuropsychologia*, 45, 644-653.
- Blaser, E., Pylyshyn, Z. W. & Holcombe, A. O. (2000). Tracking an object through feature space. *Nature*, 408, 196-199.
- Blatt, G. J., Andersen, R. A. & Stoner, G. R. (1990). Visual receptive field organization and cortico-cortical connections of the lateral intraparietal area (area LIP) in the macaque. *Journal of Comparative Neurology*, 299, 421-445.
- Bles, M., Schwarzbach, J., De Weerd, P., Goebel, R. & Jansma, B. M. (2006). Receptive field size-dependent attention effects in simultaneously presented stimulus displays. *Neuroimage*, 30, 506-511.
- Bondarko, V. M. & Semenov, L. A. (2005). Visual acuity and the crowding effect in 8- to 17-year-old schoolchildren. *Human Physiology*, 31, 532-538.
- Booth, J. R., Burman, D. D., Meyer, J. R., Lei, Z., Trommer, B. L., Davenport, N. D. et al. (2003). Neural development of selective attention and response inhibition. *Neuroimage*, 20, 737-751.
- Bortz, J. & Schuster, C. (2010). *Statistik für Human- und Sozialwissenschaftler*. Heidelberg: Springer.
- Bosse, M.-L., Tainturier, M. J. & Valdois, S. (2007). Developmental dyslexia: The visual attention span deficit hypothesis. *Cognition*, 104, 198-230.
- Bouma, H. (1970). Interaction effects in parafoveal letter recognition. *Nature*, 226, 117-178.
- Bourgeois, J. P., Goldman-Rakic, P. S. & Rakic, P. (1994). Synaptogenesis in the prefrontal cortex of rhesus monkeys. *Cerebral Cortex*, 4, 78-96.
- Breckenridge, K., Atkinson, J. & Braddick, O. (2012). Attention. In E. K. Farran & A. Karmiloff-Smith (Eds.), *Neurodevelopmental disorders across the lifespan: A neuroconstructivist approach* (pp. 119-134). Oxford: Oxford University Press.
- Brefczynski, J. A. & DeYoe, E. A. (1999). A physiological correlate of the 'spotlight' of visual attention. *Nature Neuroscience*, 2, 370-374.
- Bressler, S. L., Tang, W., Sylvester, C. M., Shulman, G. L. & Corbetta, M. (2008). Top-down control of human visual cortex by frontal and parietal cortex in anticipatory visual spatial attention. *Journal of Neuroscience*, 28, 10056-10061.
- Brett, M., Penny, W. D. & Kiebel, S. J. (2004). An introduction to random field theory. In R. S. Frackowiak, C. D. Frith, R. Dolan, K. J. Friston, C. J. Price, S. Zeki, J. Ashburner &

- W. D. Penny (Eds.), *Human brain function* (pp. 867-880). New York, NY: Academic Press.
- Brodeur, D. A. & Enns, J. T. (1997). Covert visual orienting across the lifespan. *Canadian Journal of Experimental Psychology*, 51, 20-35.
- Brooks, L. R. (1967). The suppression of visualization by reading. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 19, 289-299.
- Bucher, K., Dietrich, T., Marcar, V. L., Brem, S., Halder, P., Boujraf, S. et al. (2006). Maturation of luminance- and motion-defined form perception beyond adolescence: A combined ERP and fMRI study. *Neuroimage*, 31, 1625-1636.
- Bunge, S. A., Dudukovic, N. M., Thomason, M. E., Vaidya, C. J. & Gabrieli, J. D. (2002). Immature frontal lobe contributions to cognitive control in children: Evidence from fMRI. *Neuron*, 33, 301-311.
- Bunge, S. A. & Wright, S. B. (2007). Neurodevelopmental changes in working memory and cognitive control. *Current Opinion in Neurobiology*, 17, 243-250.
- Burger, K. (2010). How does early childhood care and education affect cognitive development? *Early Childhood Research Quarterly*, 25, 140-165.
- Burnett Heyes, S., Zokaei, N., van der Staaij, I., Bays, P. M. & Husain, M. (2012). Development of visual working memory precision in childhood. *Developmental Science*, 15, 528-539.
- Burr, D. C., Turi, M. & Anobile, G. (2010). Subitizing but not estimation of numerosity requires attentional resources. *Journal of Vision*, 10, 20.
- Buschman, T. J. & Miller, E. K. (2007). Top-down versus bottom-up control of attention in the prefrontal and posterior parietal cortices. *Science*, 315, 1860-1862.
- Caparos, S. & Linnell, K. J. (2010). The spatial focus of attention is controlled at perceptual and cognitive levels. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 36, 1080-1107.
- Carey, S., Diamond, R. & Woods, B. (1980). The development of face recognition: A maturational component? *Developmental Psychology*, 16, 257-269.
- Carrasco, M. (2011). Visual attention: The past 25 years. *Vision Research*, 51, 1484-1525.
- Case, R., Kurland, D. M. & Goldberg, J. (1982). Operational efficiency and the growth of short-term memory span. *Journal of Experimental Child Psychology*, 33, 386-404.
- Cavanagh, P. (2004). Attention routines and the architecture of selection. In M. I. Posner (Ed.), *Cognitive neuroscience of attention* (pp. 13-28). New York, NY: Guilford.
- Cavanagh, P. (2011). Visual cognition. *Vision Research*, 51, 1538-1551.
- Cavanagh, P. & Alvarez, G. (2005). Tracking multiple targets with multifocal attention. *Trends in Cognitive Sciences*, 9, 349-354.
- Cavanagh, P. & He, S. (2011). Attention mechanisms for counting in stabilized and dynamic displays. In E. Brannon & S. Dehaene (Eds.), *Attention and Performance XXIV*. Oxford: Oxford University Press.
- Cavanagh, P., Hunt, A. R., Afraz, A. & Rolfs, M. (2010). Visual stability based on remapping of attention pointers. *Trends in Cognitive Sciences*, 14, 147-153.
- Cheal, M., Lyon, D. & Gottlob, L. (1994). A framework for understanding the allocation of attention in location-precued discrimination. *Quarterly Journal of Experimental Psychology: Human Experimental Psychology*, 47, 699-739.
- Chelazzi, L., Miller, E. K., Duncan, J. & Desimone, R. (1993). A neural basis for visual search in inferior temporal cortex. *Nature*, 363, 345-347.

- Chenault, B., Thomson, J., Abbott, R. D. & Berninger, V. W. (2006). Effects of prior attention training on child dyslexics' response to composition instruction. *Developmental Neuropsychology*, 29, 243-260.
- Chi, M. T. H. & Klahr, D. (1975). Span and rate of apprehension in children and adults. *Journal of Experimental Child Psychology*, 19, 434-439.
- Christensen, M. S., Ramsøy, T. Z., Lund, T. E., Madsen, K. H. & Rowe, J. B. (2006). An fMRI study of the neural correlates of graded visual perception. *Neuroimage*, 31, 1711-1725.
- Chun, M. M. (2011). Visual working memory as visual attention sustained internally over time. *Neuropsychologia*, 49, 1407-1409.
- Chun, M. M., Golomb, J. D. & Turk-Browne, N. B. (2011). A taxonomy of external and internal attention. *Annual Review of Psychology*, 62, 73-101.
- Chun, M. M. & Wolfe, J. M. (2001). Visual attention. In E. B. Goldstein (Ed.), *Blackwell handbook of perception* (pp. 272-310). Malden, MA: Blackwell.
- Church, J. A., Petersen, S. E. & Schlaggar, B. L. (2010). The "Task B problem" and other considerations in developmental functional neuroimaging. *Human Brain Mapping*, 31, 852-862.
- Clarke, D. D. & Sokoloff, L. (1994). Circulation and energy metabolism of the brain. In G. J. Siegel, B. W. Agranoff, R. W. Albers & P. B. Molinoff (Eds.), *Basic Neurochemistry* (pp. 645-660). New York, NY: Raven.
- Cohen, J. D., Perlstein, W. M., Braver, T. S., Nystrom, L. E., Noll, D. C., Jonides, J. et al. (1997). Temporal dynamics of brain activation during a working memory task. *Nature*, 386, 604-608.
- Conklin, H. M., Luciana, M., Hooper, C. J. & Yarger, R. S. (2007). Working memory performance in typically developing children and adolescents: Behavioral evidence of protracted frontal lobe development. *Developmental Neuropsychology*, 31, 103-128.
- Conner, I. P., Sharma, S., Lemieux, S. K. & Mendola, J. D. (2004). Retinotopic organization in children measured with fMRI. *Journal of Vision*, 4, 509-523.
- Connor, C. E., Gallant, J. L., Preddie, D. C. & Van Essen, D. C. (1996). Responses in area V4 depend on the spatial relationship between stimulus and attention. *Journal of Neurophysiology*, 75, 1306-1308.
- Connor, C. E., Preddie, D. C., Gallant, J. L. & Van Essen, D. C. (1997). Spatial attention effects in macaque area V4. *Journal of Neuroscience*, 17, 3201-3214.
- Conway, A. R., Kane, M. J., Bunting, M. F., Hambrick, D. Z., Wilhelm, O. & Engle, R. W. (2005). Working memory span tasks: A methodological review and user's guide. *Psychonomic Bulletin & Review*, 12, 769-786.
- Corbetta, M. (1998). Frontoparietal cortical networks for directing attention and the eye to visual locations: Identical, independent, or overlapping neural systems? *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 95, 831-838.
- Corbetta, M. & Shulman, G. L. (2002). Control of goal-directed and stimulus-driven attention in the brain. *Nature Reviews Neuroscience*, 3, 201-215.
- Corsi, P. M. (1972). Human memory and the medial temporal region of the brain. *Dissertation Abstracts International*, 34, 819B.
- Couperus, J. W. (2011). Perceptual load influences selective attention across development. *Developmental Psychology*, 47, 1431-1439.
- Cowan, N. (2001). The magical number 4 in short-term memory: A reconsideration of mental storage capacity. *Behavioral and Brain Sciences*, 24, 87-185.

- Cowan, N. (2005). *Working memory capacity*. New York, NY: Psychology Press.
- Cowan, N. (2013). Short-term and working memory in childhood In P. J. Bauer & R. Fivush (Eds.), *The Wiley-Blackwell handbook on the development of children's memory*. Chichester: Wiley-Blackwell.
- Cowan, N. & Alloway, T. (2009). Development of working memory in childhood. In M. L. Courage & N. Cowan (Eds.), *The development of memory in infancy and childhood* (pp. 303-342). London: Psychology Press.
- Cowan, N., AuBuchon, A. M., Gilchrist, A. L., Ricker, T. J. & Sauls, J. S. (2011). Age differences in visual working memory capacity: Not based on encoding limitations. *Developmental Science*.
- Cowan, N., Elliott, E. M., Sauls, J. S., Morey, C. C., Mattox, S., Hismjatullina, A. et al. (2005). On the capacity of attention: Its estimation and its role in working memory and cognitive aptitudes. *Cognitive Psychology*, 51, 42-100.
- Cowan, N., Fristoe, N. M., Elliott, E. M., Brunner, R. P. & Sauls, J. S. (2006). Scope of attention, control of attention and intelligence in children and adults. *Memory and Cognition*, 34, 1754-1768.
- Cowan, N., Morey, C. C., AuBuchon, A. M., Zwilling, C. E. & Gilchrist, A. L. (2010). Seven-year-olds allocate attention like adults unless working memory is overloaded. *Developmental Science*, 13, 120-133.
- Crottaz-Herbette, S. & Menon, V. (2006). Where and when the anterior cingulate cortex modulates attentional response: Combined fMRI and ERP evidence. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 18, 766-780.
- Culham, J. C., Brandt, S. A., Cavanagh, P., Kanwisher, N. G., Dale, A. M. & Tootell, R. B. (1998). Cortical fMRI activation produced by attentive tracking of moving targets. *Journal of Neurophysiology*, 80, 2657-2670.
- Culham, J. C., Cavanagh, P. & Kanwisher, N. G. (2001). Attention response functions: Characterizing brain areas using fMRI activation during parametric variations of attentional load. *Neuron*, 32, 737-745.
- Cutzu, F. & Tsotsos, J. K. (2003). The selective tuning model of attention: Psychophysical evidence for a suppressive annulus around an attended item. *Vision Research*, 43, 205-219.
- d'Avossa, G., Shulman, G. L., Snyder, A. Z. & Corbetta, M. (2006). Attentional selection of moving objects by a serial process. *Vision Research*, 46, 3403-3412.
- Daneman, M. & Carpenter, P. A. (1980). Individual differences in working memory and reading. *Journal of Verbal Learning and Verbal Behavior*, 19, 450-466.
- Davison, A. C. & Hinkley, D. V. (1997). *Bootstrap methods and their application*. Cambridge: Cambridge University Press.
- de Ribeaupierre, A., Fagot, D. & Lecerf, T. (2011). Working memory capacity and its role in cognitive development: Are age differences driven by the same processes across the lifespan? In P. Barrouillet & V. Gaillard (Eds.), *Cognitive development and working memory: A dialogue between neo-Piagetian theories and cognitive approaches* (pp. 105-150). London: Psychology Press.
- Deary, I. J., Simonotto, E., Meyer, M., Marshall, A., Marshall, I., Goddard, N. et al. (2004). The functional anatomy of inspection time: An event-related fMRI study. *Neuroimage*, 22, 1466-1479.
- Deichmann, R., Gottfried, J. A., Hutton, C. & Turner, R. (2003). Optimized EPI for fMRI studies of the orbitofrontal cortex. *Neuroimage*, 19, 430-441.

- Della Sala, S., Gray, C., Baddeley, A., Allamano, N. & Wilson, L. (1999). Pattern span: A tool for unwelding visuo-spatial memory. *Neuropsychologia*, 37, 1189-1199.
- Demetriou, A. & Mouyi, A. (2011). Processing efficiency, representational capacity, and reasoning: Modelling their dynamic interactions. In P. Barrouillet & V. Gaillard (Eds.), *Cognitive development and working memory: A dialogue between neo-Piagetian theories and cognitive approaches* (pp. 69-104). London: Psychology Press.
- Dempster, F. N. (1993). Resistance to interference: Developmental changes in a basic processing mechanism. In M. L. Howe & R. Pasnak (Eds.), *Emerging themes in cognitive development, Vol. I* (pp. 3-27). New York, NY: Springer.
- Desimone, R. & Duncan, J. (1995). Neural mechanisms of selective visual attention. *Annual Review of Neuroscience*, 18, 193-222.
- Diamond, R., Carey, S. & Back, K. J. (1983). Genetic influences on the development of spatial skills during early adolescence. *Cognition*, 13, 167-185.
- Döpfner, M. & Lehmkuhl, G. (2003). *Diagnostik-System für psychische Störungen im Kindes- und Jugendalter nach ICD-10 und DSM-IV (DISYPS-KJ)*. Bern: Huber.
- Dosenbach, N. U. F., Fair, D. A., Cohen, A. L., Schlaggar, B. L. & Petersen, S. E. (2008). A dual-networks architecture of top-down control. *Trends in Cognitive Sciences*, 12, 99-105.
- Doshier, B. A. & Lu, Z. L. (2000). Noise exclusion in spatial attention. *Psychological Science*, 11, 139-146.
- Downing, C. J. & Pinker, S. (1985). The spatial structure of visual attention. In M. I. Posner & O. S. M. Marin (Eds.), *Attention and Performance XI* (pp. 171-187). London: Erlbaum.
- Drew, T., McCollough, A. W., Horowitz, T. S. & Vogel, E. K. (2009). Attentional enhancement during multiple-object tracking. *Psychonomic Bulletin & Review*, 16, 411-417.
- Drew, T. & Vogel, E. K. (2008). Neural measures of individual differences in selecting and tracking multiple moving objects. *Journal of Neuroscience*, 28, 4183-4191.
- Dye, M. W. & Bavelier, D. (2010). Differential development of visual attention skills in school-age children. *Vision Research*, 50, 452-459.
- Edin, F., Klingberg, T., Johansson, P., McNab, F., Tegner, J. & Compte, A. (2009). Mechanism for top-down control of working memory capacity. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 106, 6802-6807.
- Efron, B. & Tibshirani, R. J. (1993). *An introduction to the bootstrap*. New York, NY: Chapman & Hall.
- Eid, M., Gollwitzer, M. & Schmitt, M. (2010). *Statistik und Forschungsmethoden*. Weinheim: Beltz.
- Ellemberg, D., Lewis, T. L., Dirks, M., Maurer, D., Ledgeway, T., Guillemot, J. P. et al. (2004). Putting order into the development of sensitivity to global motion. *Vision Research*, 44, 2403-2411.
- Ellemberg, D., Lewis, T. L., Liu, C. H. & Maurer, D. (1999). Development of spatial and temporal vision during childhood. *Vision Research*, 39, 2325-2333.
- Ellemberg, D., Lewis, T. L., Meghji, K. S., Maurer, D., Guillemot, J. P. & Lepore, F. (2003). Comparison of sensitivity to first- and second-order local motion in 5-year-olds and adults. *Spatial Vision*, 16, 419-428.
- Enns, J. T. & Akhtar, N. (1989). A developmental study of filtering in visual attention. *Child Development*, 60, 1188-1199.

- Enns, J. T. & Brodeur, D. A. (1989). A developmental study of covert orienting to peripheral visual cues. *Journal of Experimental Child Psychology*, 48, 171-189.
- Enns, J. T. & Girgus, J. S. (1985). Developmental changes in selective and integrative visual attention. *Journal of Experimental Child Psychology*, 40, 319-337.
- Eriksen, B. A. & Eriksen, C. W. (1974). Effects of noise letters upon the identification of a target in a nonsearch task. *Perception & Psychophysics*, 16.
- Eriksen, C. W. & St. James, J. D. (1986). Visual attention within and around the field of focal attention: A zoom lens model. *Perception & Psychophysics*, 40, 225-240.
- Eriksen, C. W. & Yeh, Y.-Y. (1985). Allocation of attention in the visual field. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 11, 583-597.
- Esser, T. (2009). Test Tone Generator [Computer software]. Retrieved from <http://www.esseraudio.com/de/test-tone-generator-windows-software-generate-test-signal-sine-pink-noise-crest-factor.html>.
- Facoetti, A., Lorusso, M. L., Paganoni, P., Cattaneo, C., Galli, R. & Mascetti, G. G. (2003). The time course of attentional focusing in dyslexic and normally reading children. *Brain and Cognition*, 53, 181-184.
- Fair, D. A., Cohen, A. L., Power, J. D., Dosenbach, N. U. F., Church, J. A., Miezin, F. M. et al. (2009). Functional brain networks develop from a "local to distributed" organization. *PLoS Computational Biology*, 5, e1000381.
- Fair, D. A., Dosenbach, N. U., Church, J. A., Cohen, A. L., Brahmbhatt, S., Miezin, F. M. et al. (2007). Development of distinct control networks through segregation and integration. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 104, 13507-13512.
- Fan, J., Heckman, N. E. & Wand, M. P. (1995). Local polynomial kernel regression for generalized linear models and quasi-likelihood functions. *Journal of the American Statistical Association*, 90, 141-150.
- Farran, E. K. & Karmiloff-Smith, A. (Eds.). (2012). *Neurodevelopmental disorders across the lifespan: A neuroconstructivist approach*. Oxford: Oxford University Press.
- Farzin, F., Rivera, S. M. & Whitney, D. (2010). Spatial resolution of conscious visual perception in infants. *Psychological Science*, 21, 1502-1509.
- Fechner, G. T. (1860). *Elemente der Psychophysik*. Leipzig: Breitkopf und Härtel.
- Feng, J., Pratt, J. & Spence, I. (2012). Attention and visuospatial working memory share the same processing resources. *Frontiers in Psychology*, 3, 103.
- Ferretti, G., Mazzotti, S. & Brizzolara, D. (2008). Visual scanning and reading ability in normal and dyslexic children. *Behavioural Neurology*, 19, 87-92.
- Fimm, B. (2007). Aufmerksamkeit. In L. Kaufmann, K. Konrad, H.-C. Nürk & K. Willmes (Eds.), *Kognitive Entwicklungsneuropsychologie* (pp. 153-176). Göttingen: Hogrefe.
- Fischer, J. & Whitney, D. (2009). Attention narrows position tuning of population responses in V1. *Current Biology*, 19, 1356-1361.
- Flechsig, P. (1920). *Anatomie des menschlichen Gehirns und Rückenmarks auf myelogenetischer Grundlage*. Leipzig: Thieme.
- Foster, D. H. & Bischof, W. F. (1991). Thresholds from psychometric functions: Superiority of bootstrap to incremental and probit variance estimators. *Psychological Bulletin*, 109, 152-159.
- Fougnie, D. & Marois, R. (2006). Distinct capacity limits for attention and working memory. *Psychological Science*, 17, 526-534.

- Franconeri, S. L., Jonathan, S. & Scimeca, J. M. (2010). Tracking multiple objects is limited only by object spacing, not speed, time, or capacity. *Psychological Science*, 21, 920-925.
- Franconeri, S. L., Lin, J. Y., Pylyshyn, Z. W., Fisher, B. & Enns, J. T. (2008). Evidence against a speed limit in multiple-object tracking. *Psychonomic Bulletin & Review*, 15, 802-808.
- Franke, G. H. (2002). *SCL-90-R. Symptom-Checkliste von L.R. Derogatis*. Göttingen: Beltz Test GmbH.
- Fries, P., Womelsdorf, T., Oostenveld, R. & Desimone, R. (2008). The effects of visual stimulation and selective visual attention on rhythmic neuronal synchronization in macaque area V4. *Journal of Neuroscience*, 28, 4823-4835.
- Friston, K. J., Fletcher, P., Josephs, O., Holmes, A., Rugg, M. D. & Turner, R. (1998). Event-related fMRI: Characterizing differential responses. *Neuroimage*, 7, 30-40.
- Friston, K. J., Frith, C. D., Turner, R. & Frackowiak, R. S. (1995). Characterizing evoked hemodynamics with fMRI. *Neuroimage*, 2, 157-165.
- Friston, K. J., Holmes, A. P., Price, C. J., Büchel, C. & Worsley, K. J. (1999). Multisubject fMRI studies and conjunction analyses. *Neuroimage*, 10, 385-396.
- Friston, K. J., Holmes, A. P., Worsley, K. J., Poline, J. B., Frith, C. D. & Frackowiak, R. S. J. (1995). Statistical parametric maps in functional imaging: A general linear approach. *Human Brain Mapping*, 2, 189-210.
- Friston, K. J., Williams, S., Howard, R., Frackowiak, R. S. & Turner, R. (1996). Movement-related effects in fMRI time-series. *Magnetic Resonance in Medicine*, 35, 346-355.
- Fry, A. F. & Hale, S. (1996). Processing speed, working memory, and fluid intelligence: Evidence for a developmental cascade. *Psychological Science*, 7, 237-241.
- Fry, A. F. & Hale, S. (2000). Relationships among processing speed, working memory, and fluid intelligence in children. *Biological Psychology*, 54, 1-34.
- Funahashi, S., Bruce, C. J. & Goldman-Rakic, P. S. (1989). Mnemonic coding of visual space in the monkey's dorsolateral prefrontal cortex. *Journal of Neurophysiology*, 61, 331-349.
- Fusser, F., Linden, D. E., Rahm, B., Hampel, H., Haenschel, C. & Mayer, J. S. (2011). Common capacity-limited neural mechanisms of selective attention and spatial working memory encoding. *European Journal of Neuroscience*, 34, 827-838.
- Garrad-Cole, F., Shapiro, K. L. & Thierry, G. (2011). Developmental aspects of temporal and spatial visual attention: Insights from the attentional blink and visual search tasks. *Child Neuropsychology*, 17, 118-137.
- Gathercole, S. E., Pickering, S. J., Ambridge, B. & Wearing, H. (2004). The structure of working memory from 4 to 15 years of age. *Developmental Psychology*, 40, 177-190.
- Gazzaley, A. & Nobre, A. C. (2012). Top-down modulation: Bridging selective attention and working memory. *Trends in Cognitive Sciences*, 16, 129-135.
- Geier, C. F., Garver, K., Terwilliger, R. & Luna, B. (2009). Development of working memory maintenance. *Journal of Neurophysiology*, 101, 84-99.
- Genovese, C. R., Lazar, N. A. & Nichols, T. (2002). Thresholding of statistical maps in functional neuroimaging using the false discovery rate. *Neuroimage*, 15, 870-878.
- Gerhardstein, P. & Rovee-Collier, C. (2002). The development of visual search in infants and very young children. *Journal of Experimental Child Psychology*, 81, 194-215.
- Gescheider, G. (1997). *Psychophysics: The fundamentals*. Mahwah, NJ: Lawrence Erlbaum Associates.

- Giaschi, D. & Regan, D. (1997). Development of motion-defined figure-ground segregation in preschool and older children, using a letter-identification task. *Optometry and Vision Science*, 74, 761-767.
- Giedd, J. N. (2004). Structural magnetic resonance imaging of the adolescent brain. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1021, 77-85.
- Giedd, J. N., Blumenthal, J., Jeffries, N. O., Castellanos, F. X., Liu, H., Zijdenbos, A. et al. (1999). Brain development during childhood and adolescence: A longitudinal MRI study. *Nature Neuroscience*, 2, 861-863.
- Giedd, J. N. & Rapoport, J. L. (2010). Structural MRI of pediatric brain development: What have we learned and where are we going? *Neuron*, 67, 728-734.
- Givens, G. H. & Hoeting, J. A. (2013). *Computational statistics*. Hoboken, NJ: Wiley.
- Gogtay, N., Giedd, J. N., Lusk, L., Hayashi, K. M., Greenstein, D., Vaituzis, A. C. et al. (2004). Dynamic mapping of human cortical development during childhood through early adulthood. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 101, 8174-8179.
- Goldberg, M. C., Maurer, D. & Lewis, T. L. (2001). Developmental changes in attention: The effects of endogenous cueing and of distractors. *Developmental Science*, 4, 209-219.
- Goldstein, E. B. (2009). *Sensation and Perception*. Belmont, CA: Wadsworth.
- Goodman, R. (1997). The Strengths and Difficulties Questionnaire: A research note. *Journal of Child Psychology and Psychiatry*, 38, 581-586.
- Gottlieb, J. (2007). From thought to action: The parietal cortex as a bridge between perception, action and cognition. *Neuron*, 53, 9-16.
- Gottlieb, J. & Balan, P. (2010). Attention as a decision in information space. *Trends in Cognitive Sciences*, 14, 240-248.
- Gottlieb, J., Balan, P. F., Oristaglio, J. & Schneider, D. (2009). Task specific computations in attentional maps. *Vision Research*, 49, 1216-1226.
- Green, C. S. & Bavelier, D. (2006). Effect of action video games on the spatial distribution of visuospatial attention. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 32, 1465-1478.
- Green, C. S. & Bavelier, D. (2007). Action-video-game experience alters the spatial resolution of vision. *Psychological Science*, 18, 88-94.
- Green, D. M. & Swets, J. A. (1966). *Signal detection theory and psychophysics*. New York, NY: Wiley.
- Grefkes, C., Eickhoff, S. B. & Fink, G. R. (2013). Konnektivität. In F. Schneider & G. R. Fink (Eds.), *Funktionelle MRT in Psychiatrie und Neurologie* (pp. 457-469). Heidelberg: Springer.
- Gregoriou, G. G., Gotts, Stephen J. & Desimone, R. (2012). Cell-type-specific synchronization of neural activity in FEF with V4 during attention. *Neuron*, 73, 581-594.
- Grinband, J., Hirsch, J. & Ferrera, V. P. (2006). A neural representation of categorization uncertainty in the human brain. *Neuron*, 49, 757-763.
- Grooten, S., Hutton, C., Ashburner, J., Howseman, A. M., Josephs, O., Rees, G. et al. (2000). Characterization and correction of interpolation effects in the realignment of fMRI time series. *Neuroimage*, 11, 49-57.
- Guyatt, G., Jaeschke, R., Heddle, N., Cook, D., Shannon, H. & Walter, S. (1995). Interpreting study results: Confidence intervals. *Canadian Medical Association Journal*, 152, 163-173.



- Haberlandt, K. (1997). *Cognitive psychology*. Boston, MA: Allyn & Bacon.
- Hager, W., Spies, K. & Heise, E. (2001). *Versuchsdurchführung und Versuchsbericht*. Göttingen: Hogrefe.
- Halberda, J., Sires, S. F. & Feigenson, L. (2006). Multiple spatially overlapping sets can be enumerated in parallel. *Psychological Science*, 17, 572-576.
- Halford, G. S. & Andrews, G. (2011). Information-processing models of cognitive development. In U. Goswami (Ed.), *The Wiley-Blackwell handbook of childhood cognitive development* (pp. 697-722). Chichester: Wiley-Blackwell.
- Halford, G. S., Wilson, W. H. & Phillips, S. (1998). Processing capacity defined by relational complexity: Implications for comparative, developmental, and cognitive psychology. *Behavioral and Brain Sciences*, 21, 803-864.
- Hanania, R. & Smith, L. B. (2010). Selective attention and attention switching: Towards a unified developmental approach. *Developmental Science*, 13, 622-635.
- Handwerker, D. A., Ollinger, J. M. & D'Esposito, M. (2004). Variation of BOLD hemodynamic responses across subjects and brain regions and their effects on statistical analyses. *Neuroimage*, 21, 1639-1651.
- Harvey, L. O. (2010). RScorePlus (Version 5.6.1) [Computer software]. Retrieved May 21, 2013, from <http://psych.colorado.edu/~lharvey/html/software.html>.
- He, S. & Cavanagh, P. (1996). Attentional resolution and the locus of visual awareness. *Nature*, 383, 334-338.
- He, S., Cavanagh, P. & Intriligator, J. (1997). Attentional resolution. *Trends in Cognitive Sciences*, 1, 115-121.
- Heeger, D. J. & Ress, D. (2002). What does fMRI tell us about neuronal activity? *Nature Reviews Neuroscience*, 3, 142-151.
- Heekeren, H. R., Marrett, S. & Ungerleider, L. G. (2008). The neural systems that mediate human perceptual decision making. *Nature Reviews Neuroscience*, 9, 467-479.
- Heitz, R. P. & Engle, R. W. (2007). Focusing the spotlight: Individual differences in visual attention control. *Journal of Experimental Psychology: General*, 136, 217-240.
- Hendrix, A. (2003). *Magnete, Spins und Resonanzen: Eine Einführung in die Grundlagen der Magnetresonanztomographie*. Erlangen: Siemens Medical Solutions.
- Henson, R. (2004). Analysis of fMRI timeseries: Linear time-invariant models, event-related fMRI and optimal experimental design. In R. S. Frackowiak, C. D. Frith, R. Dolan, K. J. Friston, C. J. Price, S. Zeki, J. Ashburner & W. D. Penny (Eds.), *Human brain function* (pp. 793-822). New York, NY: Academic Press.
- Herrero, J. L., Roberts, M. J., Delicato, L. S., Gieselmann, M. A., Dayan, P. & Thiele, A. (2008). Acetylcholine contributes through muscarinic receptors to attentional modulation in V1. *Nature*, 454, 1110-1114.
- Ho, C. S., Paul, P. S., Asirvatham, A., Cavanagh, P., Cline, R. & Giaschi, D. E. (2006). Abnormal spatial selection and tracking in children with amblyopia. *Vision Research*, 46, 3274-3283.
- Hoffman, L. G., Rouse, M. & Ryan, J. B. (1981). Dynamic visual acuity: A review. *Journal of the American Optometric Association*, 52, 883-887.
- Holcombe, A. O. & Chen, W.-Y. (2012). Exhausting attentional tracking resources with a single fast-moving object. *Cognition*, 123, 218-228.
- Holmes, A. & Friston, K. (1998). Generalisability, random effects and population inference. *Neuroimage*, 7, 754.

- Hommel, B., Li, K. Z. H. & Li, S.-C. (2004). Visual search across the life span. *Developmental Psychology*, 40, 545-558.
- Hopf, J. M. (2006). The neural site of attention matches the spatial scale of perception. *Journal of Neuroscience*, 26, 3532-3540.
- Hopf, J. M., Boehler, C. N., Schoenfeld, M. A., Heinze, H. J. & Tsotsos, J. K. (2010). The spatial profile of the focus of attention in visual search: Insights from MEG recordings. *Vision Research*, 50, 1312-1320.
- Hopfinger, J. B., Buonocore, M. H. & Mangun, G. R. (2000). The neural mechanisms of top-down attentional control. *Nature Neuroscience*, 3, 284-291.
- Horn, R. (2009). *Standard Progressive Matrices (SPM)*. Frankfurt: Pearson Assessment.
- Houdé, O., Rossi, S., Lubin, A. & Joliot, M. (2010). Mapping numerical processing, reading, and executive functions in the developing brain: An fMRI meta-analysis of 52 studies including 842 children. *Developmental Science*, 13, 876-885.
- Howard, C. J. & Holcombe, A. O. (2008). Tracking the changing features of multiple objects: Progressively poorer perceptual precision and progressively greater perceptual lag. *Vision Research*, 48, 1164-1180.
- Howe, P. D., Cohen, M. A., Pinto, Y. & Horowitz, T. S. (2010). Distinguishing between parallel and serial accounts of multiple object tracking. *Journal of Vision*, 10, 1-13.
- Howe, P. D., Horowitz, T. S., Akos Morocz, I., Wolfe, J. M. & Livingstone, M. S. (2009). Using fMRI to distinguish components of the multiple object tracking task. *Journal of Vision*, 9, 10-10.
- Huang-Pollock, C. L., Carr, T. H. & Nigg, J. T. (2002). Development of selective attention: Perceptual load influences early versus late attentional selection in children and adults. *Developmental Psychology*, 38, 363-375.
- Huettel, S. A., Song, A. W. & McCarthy, G. (2009). *Functional magnetic resonance imaging*. Sunderland, MA: Sinauer Associates.
- Hulleman, J. (2005). The mathematics of multiple object tracking: From proportions correct to number of objects tracked. *Vision Research*, 45, 2298-2309.
- Huttenlocher, P. R. (1990). Morphometric study of human cerebral cortex development. *Neuropsychologia*, 28, 517-527.
- Huttenlocher, P. R. & Dabholkar, A. S. (1997). Regional differences in synaptogenesis in human cerebral cortex. *Journal of Comparative Neurology*, 387, 167-178.
- Huttenlocher, P. R. & de Courten, C. (1987). The development of synapses in striate cortex of man. *Human Neurobiology*, 6, 1-9.
- Huttenlocher, P. R., de Courten, C., Garey, L. J. & van der Loos, H. (1982). Synaptogenesis in human visual cortex: Evidence for synapse elimination during normal development. *Neuroscience Letters*, 33, 247-252.
- Huynh, H. & Feldt, L. S. (1976). Estimation of the Box correction for degrees of freedom from sample data in randomised block and split-plot designs. *Journal of Educational Statistics*, 1, 69-82.
- Iarocci, G., Enns, J. T., Randolph, B. & Burack, J. A. (2009). The modulation of visual orienting reflexes across the lifespan. *Developmental Science*, 12, 715-724.
- Ikkai, A. & Curtis, C. E. (2011). Common neural mechanisms supporting spatial working memory, attention and motor intention. *Neuropsychologia*, 49, 1428-1434.
- Intriligator, J. & Cavanagh, P. (2001). The spatial resolution of visual attention. *Cognitive Psychology*, 43, 171-216.

- Iordanescu, L., Grabowecky, M. & Suzuki, S. (2009). Demand-based dynamic distribution of attention and monitoring of velocities during multiple-object tracking. *Journal of Vision*, 9, 1-12.
- Ishigaki, H. & Miyao, M. (1994). Implications for dynamic visual acuity with changes in age and sex. *Perceptual and Motor Skills*, 78, 363-369.
- Jenkinson, M., Bannister, P., Brady, M. & Smith, S. (2002). Improved optimization for the robust and accurate linear registration and motion correction of brain images. *Neuroimage*, 17, 825-841.
- Jeon, S. T., Hamid, J., Maurer, D. & Lewis, T. L. (2010). Developmental changes during childhood in single-letter acuity and its crowding by surrounding contours. *Journal of Experimental Child Psychology*, 107, 423-437.
- Jevons, W. (1871). The power of numerical discrimination. *Nature*, 3, 281-282.
- Jha, A. P., Krompinger, J. & Baime, M. J. (2007). Mindfulness training modifies subsystems of attention. *Cognitive, Affective & Behavioral Neuroscience*, 7, 109-119.
- Johnson, M. H. (2001). Functional brain development in humans. *Nature Reviews Neuroscience*, 2, 475-483.
- Johnson, M. H. (2002). The development of visual attention: A cognitive neuroscience perspective. In M. H. Johnson, Y. Munakata & R. Gilmore (Eds.), *Brain development and cognition: A reader*. Oxford: Blackwell.
- Johnson, M. H. (2011). *Developmental cognitive neuroscience: An Introduction*. Chichester: Wiley-Blackwell.
- Johnston, J., McCann, R. & Remington, R. (1995). Chronometric evidence for two types of attention. *Psychological Science*, 6, 365-369.
- Jolles, D. D., Kleibeuker, S. W., Rombouts, S. A. R. B. & Crone, E. A. (2011). Developmental differences in prefrontal activation during working memory maintenance and manipulation for different memory loads. *Developmental Science*, 14, 713-724.
- Jonides, J. (1983). Further toward a model of the mind's eye's movement. *Bulletin of the Psychonomic Society*, 21, 47-450.
- Josephs, O. & Henson, R. N. (1999). Event-related functional magnetic resonance imaging: Modelling, inference and optimization. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 354, 1215-1228.
- Jovicich, J., Peters, R. J., Koch, C., Braun, J., Chang, L. & Ernst, T. (2001). Brain areas specific for attentional load in a motion-tracking task. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 13, 1048-1058.
- Kahle, W. & Frotscher, M. (2009). *Taschenatlas Anatomie*. Stuttgart: Thieme.
- Kahneman, D. (1973). *Attention and effort*. Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall.
- Kail, R. V. (1991). Developmental change in speed of processing during childhood and adolescence. *Psychological Bulletin*, 109, 490-501.
- Kane, M. J., Hambrick, D. Z., Tuholski, S. W., Wilhelm, O., Payne, T. W. & Engle, R. W. (2004). The generality of working memory capacity: A latent-variable approach to verbal and visuospatial memory span and reasoning. *Journal of Experimental Psychology: General*, 133, 189-217.
- Kastner, S. (1998). Mechanisms of directed attention in the human extrastriate cortex as revealed by functional MRI. *Science*, 282, 108-111.
- Kastner, S. & Pinsk, M. A. (2004). Visual attention as a multi-level selection process. *Cognitive, Affective & Behavioral Neuroscience*, 4, 483-500.

- Kastner, S., Pinsk, M. A., De Weerd, P., Desimone, R. & Ungerleider, L. G. (1999). Increased activity in human visual cortex during directed attention in the absence of visual stimulation. *Neuron*, 22, 751-761.
- Kaufman, A. S. & Kaufman, N. L. (2004). *Kaufman Brief Intelligence Test (KBIT-2)*. San Antonio, TX: Pearson Assessment.
- Kaufman, E. L. & Lord, M. W. (1949). The discrimination of visual number. *American Journal of Psychology*, 62, 498-525.
- Kelly, A. M., Di Martino, A., Uddin, L. Q., Shehzad, Z., Gee, D. G., Reiss, P. T. et al. (2009). Development of anterior cingulate functional connectivity from late childhood to early adulthood. *Cerebral Cortex*, 19, 640-657.
- Kessels, R. P. C., van den Berg, E., Ruis, C. & Brands, A. M. A. (2008). The backward span of the Corsi Block-Tapping Task and its association with the WAIS-III digit span. *Assessment*, 15, 426-434.
- Kessels, R. P. C., van Zandvoort, M. J. E., Postma, A., Kappelle, L. J. & de Haan, E. H. F. (2000). The Corsi block-tapping task: Standardization and normative data. *Applied Neuropsychology*, 7, 252-258.
- Kiebel, S. J. & Holmes, A. P. (2004). The general linear model. In R. S. Frackowiak, C. D. Frith, R. Dolan, K. J. Friston, C. J. Price, S. Zeki, J. Ashburner & W. D. Penny (Eds.), *Human brain function* (pp. 725-760). New York, NY: Academic Press.
- Kingdom, F. A. A. & Prins, N. (2010). *Psychophysics*. Amsterdam: Elsevier.
- Klaver, P., Lichtensteiger, J., Bucher, K., Dietrich, T., Loenneker, T. & Martin, E. (2008). Dorsal stream development in motion and structure-from-motion perception. *Neuroimage*, 39, 1815-1823.
- Klein, S. A. (2001). Measuring, estimating, and understanding the psychometric function: A commentary. *Perception & Psychophysics*, 63, 1421-1455.
- Kleinschmidt, A., Büchel, C., Hutton, C., Friston, K. J. & Frackowiak, R. S. (2002). The neural structures expressing perceptual hysteresis in visual letter recognition. *Neuron*, 34, 659-666.
- Klingberg, T., Forssberg, H. & Westerberg, H. (2002). Increased brain activity in frontal and parietal cortex underlies the development of visuospatial working memory capacity during childhood. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 14, 1-10.
- Knudsen, E. I. (2007). Fundamental components of attention. *Annual Review of Neuroscience*, 30, 57-78.
- Konrad, K., Neufang, S., Thiel, C. M., Specht, K., Hanisch, C., Fan, J. et al. (2005). Development of attentional networks: An fMRI study with children and adults. *Neuroimage*, 28, 429-439.
- Kosslyn, S. M. (1980). *Image and Mind*. Cambridge, MA: Harvard University Press.
- Kowler, E. & Steinman, R. M. (1977). The role of small saccades in counting. *Vision Research*, 17, 141-146.
- Kraft, A., Pape, N., Hagedorf, H., Schmidt, S., Naito, A. & Brandt, S. A. (2007). What determines sustained visual attention? The impact of distracter positions, task difficulty and visual fields compared. *Brain Research*, 1133, 123-135.
- Kramer, A. F. & Hahn, S. (1995). Splitting the beam: Distribution of attention over noncontiguous regions of the visual field. *Psychological Science*, 6, 381-386.
- Kramer, A. F., Humphrey, D. G., Larish, J. F., Logan, G. D. & Strayer, D. L. (1994). Aging and inhibition: Beyond a unitary view of inhibitory processing in attention. *Psychology and Aging*, 9, 491-512.

- Kuffler, S. W. (1953). Discharge patterns and functional organization of mammalian retina. *Journal of Neurophysiology*, 16, 37-68.
- Kwon, H., Reiss, A. L. & Menon, V. (2002). Neural basis of protracted developmental changes in visuo-spatial working memory. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 99, 13336-13341.
- LaBerge, D. (1983). Spatial extent of attention to letters and words. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 9, 371-379.
- LaBerge, D. & Brown, V. (1989). Theory of attentional operations in shape identification. *Psychological Review*, 96, 101-124.
- Lamme, V. A. & Roelfsema, P. R. (2000). The distinct modes of vision offered by feedforward and recurrent processing. *Trends in Neurosciences*, 23, 571-579.
- Landolt, E. (1891). Nouvelles recherches sur la physiologie des mouvements des yeux. *Archives d'Ophthalmologie*, 11, 385-395.
- Lauritzen, T. Z., D'Esposito, M., Heeger, D. J. & Silver, M. A. (2009). Top-down flow of visual spatial attention signals from parietal to occipital cortex. *Journal of Vision*, 9, 18-18.
- Lavie, N. (1995). Perceptual load as a necessary condition for selective attention. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 21, 451-468.
- Lavie, N. (2005). Distracted and confused?: Selective attention under load. *Trends in Cognitive Sciences*, 9, 75-82.
- Lavie, N., Hirst, A., de Fockert, J. W. & Viding, E. (2004). Load theory of selective attention and cognitive control. *Journal of Experimental Psychology: General*, 133, 339-354.
- Leat, S. J., Li, W. & Epp, K. (1999). Crowding in central and eccentric vision: The effects of contour interaction and attention. *Investigative Ophthalmology and Visual Science*, 40, 504-512.
- Lebel, C., Walker, L., Leemans, A., Phillips, L. & Beaulieu, C. (2008). Microstructural maturation of the human brain from childhood to adulthood. *Neuroimage*, 40, 1044-1055.
- Lecerf, T. & Roulin, J.-L. (2006). Distinction between visuo-spatial short-term-memory and working memory span tasks. *Swiss Journal of Psychology*, 65, 37-55.
- Lee, A. (2009). VirtualDub (Version 1.8.1) [Computer software]. Retrieved May 14, 2008, from [http://www.virtualdub.org/virtualdub\\_docs.html](http://www.virtualdub.org/virtualdub_docs.html).
- Lee, Y., Lu, M. & Ko, H. (2007). Effects of skill training on working memory capacity. *Learning and Instruction*, 17, 336-344.
- Lenroot, R. K., Gogtay, N., Greenstein, D. K., Wells, E. M., Wallace, G. L., Clasen, L. S. et al. (2007). Sexual dimorphism of brain developmental trajectories during childhood and adolescence. *Neuroimage*, 36, 1065-1073.
- Leslie, A. M., Xu, F., Tremoulet, P. D. & Scholl, B. J. (1998). Indexing and the object concept: Developing 'what' and 'where' systems. *Trends in Cognitive Sciences*, 2, 10-18.
- Levi, D. M. (2008). Crowding – An essential bottleneck for object recognition: A mini-review. *Vision Research*, 48, 635-654.
- Levine, M. & Ensom, M. H. H. (2001). Post hoc power analysis: An idea whose time has passed? *Pharmacotherapy*, 21, 405-409.
- Lichtensteiger, J., Loenneker, T., Bucher, K., Martin, E. & Klaver, P. (2008). Role of dorsal and ventral stream development in biological motion perception. *Neuroreport*, 19, 1763-1767.

- Linnell, K. J. & Caparos, S. (2011). Perceptual and cognitive load interact to control the spatial focus of attention. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 37, 1643-1648.
- Lobaugh, N. J., Cole, S. & Rovet, J. F. (1998). Visual search for features and conjunctions in development. *Canadian Journal of Experimental Psychology*, 52, 201-212.
- Logie, R. H. & Pearson, D. G. (1997). The inner eye and the inner scribe of visuo-spatial working memory: Evidence from developmental fractionation. *European Journal of Cognitive Psychology*, 9, 241-257.
- Logothetis, N. K., Pauls, J., Augath, M., Trinath, T. & Oeltermann, A. (2001). Neurophysiological investigation of the basis of the fMRI signal. *Nature*, 412, 150-157.
- Logothetis, N. K. & Wandell, B. A. (2004). Interpreting the BOLD signal. *Annual Review of Physiology*, 66, 735-769.
- Lovejoy, L. P. & Krauzlis, R. J. (2010). Inactivation of primate superior colliculus impairs covert selection of signals for perceptual judgments. *Nature Neuroscience*, 13, 261-266.
- Luciana, M., Conklin, H. M., Hooper, C. J. & Yarger, R. S. (2005). The development of nonverbal working memory and executive control processes in adolescents. *Child Development*, 76, 697-712.
- Luck, S. J., Chelazzi, L., Hillyard, S. A. & Desimone, R. (1997). Neural mechanisms of spatial selective attention in areas V1, V2, and V4 of macaque visual cortex. *Journal of Neurophysiology*, 77, 24-42.
- Luck, S. J. & Vogel, E. K. (1997). The capacity of visual working memory for features and conjunctions. *Nature*, 390, 279.
- Ludvigh, E. (1948). The visibility of moving objects. *Science*, 108, 63-64.
- Ludvigh, E. & Miller, J. W. (1958). Study of visual acuity during the ocular pursuit of moving test objects. *Journal of the Optical Society of America*, 48, 799-802.
- Luna, B., Garver, K. E., Urban, T. A., Lazar, N. A. & Sweeney, J. A. (2004). Maturation of cognitive processes from late childhood to adulthood. *Child Development*, 75, 1357-1372.
- Luna, B., Velanova, K. & Geier, C. F. (2010). Methodological approaches in developmental neuroimaging studies. *Human Brain Mapping*, 31, 863-871.
- Macdonald, J. S. & Lavie, N. (2008). Load induced blindness. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 34, 1078-1091.
- Macmillan, N. A. & Creelman, C. D. (2005). *Detection theory: A user's guide*. Mahwah, NJ: Erlbaum.
- Maimon, G. & Assad, J. A. (2006). A cognitive signal for the proactive timing of action in macaque LIP. *Nature Neuroscience*, 9, 948-955.
- Martelli, M., Di Filippo, G., Spinelli, D. & Zoccolotti, P. (2009). Crowding, reading, and developmental dyslexia. *Journal of Vision*, 9, 14-14.
- Martinez-Trujillo, J. & Treue, S. (2002). Attentional modulation strength in cortical area MT depends on stimulus contrast. *Neuron*, 35, 365-370.
- Maunsell, J. H., Nealey, T. A. & DePriest, D. D. (1990). Magnocellular and parvocellular contributions to responses in the middle temporal visual area (MT) of the macaque monkey. *Journal of Neuroscience*, 10, 3323-3334.
- Mayer, J. S., Bittner, R. A., Nikolic, D., Bledowski, C., Goebel, R. & Linden, D. E. (2007). Common neural substrates for visual working memory and attention. *Neuroimage*, 36, 441-453.

- Maylor, E. A., Watson, D. G. & Hartley, E. L. (2011). Effects of distraction on visual enumeration in children and adults. *Developmental Psychology*, 47, 1440-1447.
- Mazaika, P. (2009a). ArtRepair (Version 4) [Computer software]. Retrieved June 6, 2012, from <http://cibsr.stanford.edu/tools/human-brain-project/artrepair-software.html>.
- Mazaika, P. (2009b). Motion correction and despiking functions. Retrieved July 16, 2012, from <http://cibsr.stanford.edu/documents/MotionandDespike.pdf>.
- McAdams, C. J. & Maunsell, J. H. (1999). Effects of attention on orientation-tuning functions of single neurons in macaque cortical area V4. *Journal of Neuroscience*, 19, 431-441.
- McCarley, J. S., Mounts, J. R. W. & Kramer, A. F. (2004). Age-related differences in localized attentional interference. *Psychology and Aging*, 19, 203-210.
- McDermott, J. M., Pérez-Edgar, K. & Fox, N. A. (2007). Variations of the flanker paradigm: Assessing selective attention in young children. *Behavior Research Methods*, 39, 62-70.
- McGivern, R. F., Andersen, J., Byrd, D., Mutter, K. L. & Reilly, J. (2002). Cognitive efficiency on a match to sample task decreases at the onset of puberty in children. *Brain and Cognition*, 50, 73-89.
- McLeod, P. D. (1977). A dual task response modality effect: Support for multiprocessor models of attention. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 29, 651-667.
- McMains, S. A., Fehd, H. M., Emmanouil, T. A. & Kastner, S. (2007). Mechanisms of feature- and space-based attention: Response modulation and baseline increases. *Journal of Neurophysiology*, 98, 2110-2121.
- McPeck, R. M. (2008). Reversal of a distractor effect on saccade target selection after superior colliculus inactivation. *Journal of Neurophysiology*, 99, 2694-2702.
- Melby-Lervag, M. & Hulme, C. (2013). Is working memory training effective? A meta-analytic review. *Developmental Psychology*, 49, 270-291.
- Menon, V. & Uddin, L. Q. (2010). Saliency, switching, attention and control: A network model of insula function. *Brain Structure and Function*, 214, 655-667.
- Merrill, E. C. & Lookadoo, R. (2004). Selective search for conjunctively defined targets by children and young adults. *Journal of Experimental Child Psychology*, 89, 72-90.
- Miller, J. (1991). The flanker compatibility effect as a function of visual angle, attentional focus, visual transients, and perceptual load: A search for boundary conditions. *Perception & Psychophysics*, 49, 270-288.
- Milner, B. (1971). Interhemispheric differences in the localization of psychological processes in man. *British Medical Bulletin*, 27, 272-277.
- Mitchell, J. F., Sundberg, K. A. & Reynolds, J. H. (2007). Differential attention-dependent response modulation across cell classes in macaque visual area V4. *Neuron*, 55, 131-141.
- Monosov, I. E., Sheinberg, D. L. & Thompson, K. G. (2010). Paired neuron recordings in the prefrontal and inferotemporal cortices reveal that spatial selection precedes object identification during visual search. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 107, 13105-13110.
- Monosov, I. E. & Thompson, K. G. (2009). Frontal eye field activity enhances object identification during covert visual search. *Journal of Neurophysiology*, 102, 3656-3672.
- Moore, C. M., Hein, E., Grosjean, M. & Rinkenauer, G. (2009). Limited influence of perceptual organization on the precision of attentional control. *Attention, Perception, & Psychophysics*, 71, 971-983.

- Moore, C. M., Lanagan-Leitzel, L. K., Chen, P., Halterman, R. & Fine, E. M. (2007). Nonspatial attributes of stimuli can influence spatial limitations of attentional control. *Perception & Psychophysics*, 69, 363-371.
- Moore, C. M., Lanagan-Leitzel, L. K. & Fine, E. M. (2008). Distinguishing between the precision of attentional localization and attentional resolution. *Perception & Psychophysics*, 70, 573-582.
- Moore, T. (2006). The neurobiology of visual attention: Finding sources. *Current Opinion in Neurobiology*, 16, 159-165.
- Moore, T. & Armstrong, K. M. (2003). Selective gating of visual signals by microstimulation of frontal cortex. *Nature*, 421, 370-373.
- Mora, S. (2007). *Cognitive development: Neo-Piagetian perspectives*. London: Psychology Press.
- Moran, J. & Desimone, R. (1985). Selective attention gates visual processing in the extrastriate cortex. *Science*, 229, 782-784.
- Motter, B. C. (1993). Focal attention produces spatially selective processing in visual cortical areas V1, V2, and V4 in the presence of competing stimuli. *Journal of Neurophysiology*, 70, 909-919.
- Müller, H. & Krummenacher, J. (2007). Aufmerksamkeit. In J. Müsseler & W. Prinz (Eds.), *Allgemeine Psychologie* (pp. 103-154). Heidelberg: Spektrum Akademischer Verlag.
- Müller, H. & Rabbitt, P. M. (1989). Reflexive and voluntary orienting of visual attention: Time course of activation and resistance to interruption. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 15, 315-330.
- Müller, M. M., Malinowski, P., Gruber, T. & Hillyard, S. A. (2003). Sustained division of the attentional spotlight. *Nature*, 424, 309-312.
- Müller, N. G., Bartelt, O. A., Donner, T. H., Villringer, A. & Brandt, S. A. (2003). A physiological correlate of the "zoom lens" of visual attention. *Journal of Neuroscience*, 23, 3561-3565.
- Müller, N. G., Mollenhauer, M., Rösler, A. & Kleinschmidt, A. (2005). The attentional field has a Mexican hat distribution. *Vision Research*, 45, 1129-1137.
- Myatchin, I. & Lagae, L. (2013). Developmental changes in visuo-spatial working memory in normally developing children: event-related potentials study. *Brain and Development*, 35, 853-864.
- Nagel, B. J., Barlett, V. C., Schweinsburg, A. D. & Tapert, S. F. (2005). Neuropsychological predictors of BOLD response during a spatial working memory task in adolescents: What can performance tell us about fMRI response patterns? *Journal of Clinical and Experimental Neuropsychology*, 27, 823-839.
- Nagy, Z., Westerberg, H. & Klingberg, T. (2004). Maturation of white matter is associated with the development of cognitive functions during childhood. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 16, 1227-1233.
- Nakatsuka, M., Ueda, T., Nawa, Y., Yukawa, E., Hara, T. & Hara, Y. (2006). Effect of static visual acuity on dynamic visual acuity: A pilot study. *Perceptual and Motor Skills*, 103, 160-164.
- Nakayama, K. (1990). The iconic bottleneck and the tenuous link between early processing and perception. In C. Blakemore (Ed.), *Vision: Coding and efficiency* (pp. 411-422). Cambridge: Cambridge University Press.
- Nakayama, K. & Mackeben, M. (1989). Sustained and transient components of focal visual attention. *Vision Research*, 29, 1631-1647.



- Navon, D. & Miller, J. (2002). Queuing or sharing? A critical evaluation of the single-bottleneck notion. *Cognitive Psychology*, 44, 193-251.
- Nelson, C. A., Monk, C. S., Lin, J., Carver, L. J., Thomas, K. M. & Truwit, C. L. (2000). Functional neuroanatomy of spatial working memory in children. *Developmental Psychology*, 36, 109-116.
- Neville, H. J., Stevens, C., Pakulak, E., Bell, T. A., Fanning, J., Klein, S. et al. (2013). Family-based training program improves brain function, cognition, and behavior in lower socioeconomic status preschoolers. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 110, 12138-12143.
- Niebergall, R., Khayat, P. S., Treue, S. & Martinez-Trujillo, J. C. (2011). Expansion of MT neurons excitatory receptive fields during covert attentive tracking. *Journal of Neuroscience*, 31, 15499-15510.
- Norman, D. A. & Bobrow, D. G. (1975). On data-limited and resource-limited processes. *Cognitive Psychology*, 7, 44-64.
- Noudoost, B., Chang, M. H., Steinmetz, N. A. & Moore, T. (2010). Top-down control of visual attention. *Current Opinion in Neurobiology*, 20, 183-190.
- O'Brien, B. A., Mansfield, J. S. & Legge, G. E. (2005). The effect of print size on reading speed in dyslexia. *Journal of Research in Reading*, 28, 332-349.
- O'Hare, E. D. & Sowell, E. R. (2008). Imaging developmental changes in grey and white matter in the human brain. In C. A. Nelson & M. Luciana (Eds.), *Handbook of developmental cognitive neuroscience* (pp. 23-38). Cambridge, MA: MIT Press.
- O'Hearn, K., Hoffman, J. E. & Landau, B. (2010). Developmental profiles for multiple object tracking and spatial memory: Typically developing preschoolers and people with Williams syndrome. *Developmental Science*, 13, 430-440.
- O'Hearn, K., Hoffman, J. E. & Landau, B. (2011). Small subitizing range in people with Williams syndrome. *Visual Cognition*, 19, 289-312.
- O'Hearn, K., Landau, B. & Hoffman, J. E. (2005). Multiple object tracking in people with Williams syndrome and in normally developing children. *Psychological Science*, 16, 905-912.
- Oberauer, K., Süß, H.-M., Schulze, R., Wilhelm, O. & Wittmann, W. W. (2000). Working memory capacity: Facets of a cognitive ability construct. *Personality and Individual Differences*, 29, 1017-1045.
- Ogawa, S., Lee, T. M., Kay, A. R. & Tank, D. W. (1990). Brain magnetic resonance imaging with contrast dependent on blood oxygenation. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 87, 9868-9872.
- Oh, S. H. & Kim, M. S. (2004). The role of spatial working memory in visual search efficiency. *Psychonomic Bulletin & Review*, 11, 275-281.
- Oldfield, R. C. (1971). The assessment and analysis of handedness: The Edinburgh inventory. *Neuropsychologia*, 9, 97-113.
- Olesen, P. J., Macoveanu, J., Tegner, J. & Klingberg, T. (2006). Brain activity related to working memory and distraction in children and adults. *Cerebral Cortex*, 17, 1047-1054.
- Olesen, P. J., Nagy, Z., Westerberg, H. & Klingberg, T. (2003). Combined analysis of DTI and fMRI data reveals a joint maturation of white and grey matter in a fronto-parietal network. *Cognitive Brain Research*, 18, 48-57.
- Oristaglio, J., Schneider, D. M., Balan, P. F. & Gottlieb, J. (2006). Integration of visuospatial and effector information during symbolically cued limb movements in monkey lateral intraparietal area. *Journal of Neuroscience*, 26, 8310-8319.

- Orsini, A. (1994). Corsi's block-tapping test: Standardization and concurrent validity with WISC-R for children aged 11 to 16. *Perceptual and Motor Skills*, 79, 1547-1554.
- Palmer, J. & Moore, C. M. (2009). Using a filtering task to measure the spatial extent of selective attention. *Vision Research*, 49, 1045-1064.
- Pascual-Leone, J. A. (1970). Mathematical model for the transition rule in Piaget's developmental stages. *Acta Psychologica*, 32, 301-345.
- Pastò, L. & Burack, J. A. (1997). A developmental study of visual attention: Issues of filtering efficiency and focus. *Cognitive Development*, 12, 523-535.
- Paus, T. (1996). Location and function of the human frontal eye-field: A selective review. *Neuropsychologia*, 34, 475-483.
- Pearson, D. A. & Lane, D. M. (1990). Visual attention movements: A developmental study. *Child Development*, 61, 1779-1795.
- Pelli, D. G., Palomares, M. & Majaj, N. J. (2004). Crowding is unlike ordinary masking: Distinguishing feature integration from detection. *Journal of Vision*, 4, 1136-1169.
- Penny, W. D. & Holmes, A. J. (2004). Random-effects analysis. In R. S. Frackowiak, C. D. Frith, R. Dolan, K. J. Friston, C. J. Price, S. Zeki, J. Ashburner & W. D. Penny (Eds.), *Human brain function* (pp. 843-850). New York, NY: Academic Press.
- Petit, L., Clark, V. P., Ingelholm, J. & Haxby, J. V. (1997). Dissociation of saccade-related and pursuit-related activation in human frontal eye fields as revealed by fMRI. *Journal of Neurophysiology*, 77, 3386-3390.
- Piaget, J. (1983). Piaget's theory. In W. Kessen (Ed.), *Handbook of child psychology* (Vol. 1. History, theory, and methods). New York, NY: Wiley
- Pickering, S. J. (2001). The development of visuo-spatial working memory. *Memory*, 9, 423-432.
- Pieperhoff, P., Dickscheid, T. & Amunts, K. (2013). Grundlagen der Morphometrie. In F. Schneider & G. R. Fink (Eds.), *Funktionelle MRT in Psychiatrie und Neurologie* (pp. 87-102). Heidelberg: Springer.
- Poole, B. J. & Kane, M. J. (2009). Working-memory capacity predicts the executive control of visual search among distractors: The influences of sustained and selective attention. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 62, 1430-1454.
- Posner, M. I. (1980). Orienting of attention. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 32, 3-25.
- Posner, M. I., Nissen, M. J. & Ogden, W. C. (1978). Attended and unattended processing modes: The role of set for spatial location. In H. L. Pick & I. J. Saltzman (Eds.), *Modes of perceiving and processing information*. Hillsdale, NJ: Lawrence Erlbaum.
- Posner, M. I. & Petersen, S. E. (1990). The attention system of the human brain. *Annual Review of Neuroscience*, 13, 25-42.
- Posner, M. I., Rueda, R. & Kanske, P. (2007). Probing the mechanisms of attention. In J. T. Cacioppo (Ed.), *Handbook of psychophysiology* (pp. 410-432). Cambridge: Cambridge University Press.
- Pylyshyn, Z. W. (1989). The role of location indexes in spatial perception: A sketch of the FINST spatial-index model. *Cognition*, 32, 65-97.
- Pylyshyn, Z. W. (2007). *Things and places: How the mind connects with the world*. Cambridge, MA: MIT Press.
- Pylyshyn, Z. W. & Storm, R. W. (1988). Tracking multiple independent targets: Evidence for a parallel tracking mechanism. *Spatial Vision*, 3, 179-197.

- Rakic, P., Bourgeois, J. P., Eckenhoff, M. F., Zecevic, N. & Goldman-Rakic, P. S. (1986). Concurrent overproduction of synapses in diverse regions of the primate cerebral cortex. *Science*, 232, 232-235.
- Raven, J., Raven, J. C. & Court, J. H. (2000). *Manual for Raven's Progressive Matrices and Vocabulary Scales: Section 3. Standard progressive matrices (including the parallel and plus versions)*. Oxford: Oxford Psychologists Press.
- Rees, G. (1997). Modulating irrelevant motion perception by varying attentional load in an unrelated task. *Science*, 278, 1616-1619.
- Richards, J. E. (2008). Attention in young infants: A developmental psychophysiological perspective. In C. A. Nelson & M. Luciana (Eds.), *Handbook of developmental cognitive neuroscience* (pp. 479-497). Cambridge, MA: MIT Press.
- Richardson, D. C. & Kirkham, N. Z. (2004). Multimodal events and moving locations: Eye movements of adults and 6-month-olds reveal dynamic spatial indexing. *Journal of Experimental Psychology: General*, 133, 46-62.
- Ridderinkhof, K. R. & van der Molen, M. W. (1995). When global information and local information collide: A brain potential analysis of the locus of interference effects. *Biological Psychology*, 41, 29-53.
- Ridderinkhof, K. R. & van der Molen, M. W. (1997). Mental resources, processing speed, and inhibitory control: A developmental perspective. *Biological Psychology*, 45, 241-261.
- Ridderinkhof, K. R., van der Molen, M. W., Band, G. P. & Bashore, T. R. (1997). Sources of interference from irrelevant information: A developmental study. *Journal of Experimental Child Psychology*, 65, 315-341.
- Ridderinkhof, K. R. & van der Stelt, O. (2000). Attention and selection in the growing child: Views derived from developmental psychophysiology. *Biological Psychology*, 54, 55-106.
- Riggs, L. A. (1966). Visual acuity. In C. H. Graham (Ed.), *Vision and visual perception* (pp. 321-349). New York, NY: Wiley.
- Ristic, J. & Kingstone, A. (2009). Rethinking attentional development: Reflexive and volitional orienting in children and adults. *Developmental Science*, 12, 289-296.
- Rolfs, M., Jonikaitis, D., Deubel, H. & Cavanagh, P. (2011). Predictive remapping of attention across eye movements. *Nature Neuroscience*, 14, 252-256.
- Rosnow, R. L. & Rosenthal, R. (2003). Effect sizes for experimenting psychologists. *Canadian Journal of Experimental Psychology*, 57, 221-237.
- Rubia, K., Hyde, Z., Halari, R., Giampietro, V. & Smith, A. (2010). Effects of age and sex on developmental neural networks of visual-spatial attention allocation. *Neuroimage*, 51, 817-827.
- Rueda, M. R., Fan, J., McCandliss, B. D., Halparin, J. D., Gruber, D. B., Lercari, L. P. et al. (2004). Development of attentional networks in childhood. *Neuropsychologia*, 42, 1029-1040.
- Rütsche, A., Baumann, A., Jiang, X. & Mojon, D. S. (2006). Development of visual pursuit in the first 6 years of life. *Graefes Archive for Clinical and Experimental Ophthalmology*, 244, 1406-1411.
- Saalmann, Y. B., Pigarev, I. N. & Vidyasagar, T. R. (2007). Neural mechanisms of visual attention: How top-down feedback highlights relevant locations. *Science*, 316, 1612-1615.
- Scerif, G. (2010). Attention trajectories, mechanisms and outcomes: At the interface between developing cognition and environment. *Developmental Science*, 13, 805-812.

- Scherf, K. S., Sweeney, J. A. & Luna, B. (2006). Brain basis of developmental change in visuospatial working memory. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 18, 1045-1058.
- Schmithorst, V. J. & Yuan, W. (2010). White matter development during adolescence as shown by diffusion MRI. *Brain and Cognition*, 72, 16-25.
- Scholl, B. J. (2009). What have we learned about attention from multiple-object tracking (and vice versa)? In D. Dedrick & L. M. Trick (Eds.), *Computation, cognition, and Pylyshyn* (pp. 49-77). Cambridge, MA: MIT Press.
- Schrauf, M., Wist, E. R. & Ehrenstein, W. H. (1999). Development of dynamic vision based on motion contrast. *Experimental Brain Research*, 124, 469-473.
- Schutte, A. R., Spencer, J. P. & Schöner, G. (2003). Testing the dynamic field theory: Working memory for locations becomes more spatially precise over development. *Child Development*, 74, 1393-1417.
- Schweinsburg, A. D., Nagel, B. J. & Tapert, S. F. (2005). fMRI reveals alteration of spatial working memory networks across adolescence. *Journal of the International Neuropsychological Society*, 11, 631-644.
- Sedlmeier, P. & Renkewitz, F. (2008). *Forschungsmethoden und Statistik in der Psychologie*. München: Pearson Studium.
- Seeley, W. W., Menon, V., Schatzberg, A. F., Keller, J., Glover, G. H., Kenna, H. et al. (2007). Dissociable intrinsic connectivity networks for salience processing and executive control. *Journal of Neuroscience*, 27, 2349-2356.
- Semenov, L. A., Chernova, N. D. & Bondarko, V. M. (2000). Measurement of visual acuity and crowding effect in 3-9-year-old children. *Human Physiology*, 26, 16-20.
- Shah, P. & Miyake, A. (1996). The separability of working memory resources for spatial thinking and language processing: An individual differences approach. *Journal of Experimental Psychology: General*, 125, 4-27.
- Shaw, J. C. (1984). Correlation and coherence analysis of the EEG: A selective tutorial review. *International Journal of Psychophysiology*, 1, 255-266.
- Shim, W. M., Alvarez, G. A. & Jiang, Y. V. (2008). Spatial separation between targets constrains maintenance of attention on multiple objects. *Psychonomic Bulletin & Review*, 15, 390-397.
- Shim, W. M., Alvarez, G. A., Vickery, T. J. & Jiang, Y. V. (2009). The number of attentional foci and their precision are dissociated in the posterior parietal cortex. *Cerebral Cortex*, 20, 1341-1349.
- Shipstead, Z., Redick, T. S. & Engle, R. W. (2012). Is working memory training effective? *Psychological Bulletin*, 138, 628-654.
- Silver, M. A. & Kastner, S. (2009). Topographic maps in human frontal and parietal cortex. *Trends in Cognitive Sciences*, 13, 488-495.
- Simons, K. (1983). Visual acuity norms in young children. *Survey of Ophthalmology*, 28, 84-92.
- Simpson, A. J. & Fitter, M. J. (1973). What is the best index of detectability? *Psychological Bulletin*, 39, 82-89.
- Singh, K. D., Smith, A. T. & Greenlee, M. W. (2000). Spatiotemporal frequency and direction sensitivities of human visual areas measured using fMRI. *Neuroimage*, 12, 550-564.
- Skoczenski, A. M. & Norcia, A. M. (2002). Late maturation of visual hyperacuity. *Psychological Science*, 13, 537-541.

- Slagter, H. A., Lutz, A., Greischar, L. L., Francis, A. D., Nieuwenhuis, S., Davis, J. M. et al. (2007). Mental training affects distribution of limited brain resources. *PLoS Biology*, 5, e138.
- Slotnick, S. D., Schwarzbach, J. & Yantis, S. (2003). Attentional inhibition of visual processing in human striate and extrastriate cortex. *Neuroimage*, 19, 1602-1611.
- Smith, A. B., Halari, R., Giampetro, V., Brammer, M. & Rubia, K. (2011). Developmental effects of reward on sustained attention networks. *Neuroimage*, 56, 1693-1704.
- Somers, D. C., Dale, A. M., Seiffert, A. E. & Tootell, R. B. (1999). Functional MRI reveals spatially specific attentional modulation in human primary visual cortex. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 96, 1663-1668.
- Sowell, E. R., Peterson, B. S., Thompson, P. M., Welcome, S. E., Henkenius, A. L. & Toga, A. W. (2003). Mapping cortical change across the human life span. *Nature Neuroscience*, 6, 309-315.
- Sowell, E. R., Thompson, P. M., Leonard, C. M., Welcome, S. E., Kan, E. & Toga, A. W. (2004). Longitudinal mapping of cortical thickness and brain growth in normal children. *Journal of Neuroscience*, 24, 8223-8231.
- Sridharan, D., Levitin, D. J. & Menon, V. (2008). A critical role for the right fronto-insular cortex in switching between central-executive and default-mode networks. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 105, 12569-12574.
- Steinman, B. A., Steinman, S. B. & Lehmkuhle, S. (1995). Visual attention mechanisms show a center-surround organization. *Vision Research*, 35, 1859-1857.
- Sterzer, P. & Kleinschmidt, A. (2010). Anterior insula activations in perceptual paradigms: Often observed but barely understood. *Brain Structure and Function*, 214, 611-622.
- Stevens, C. & Bavelier, D. (2012). The role of selective attention on academic foundations: A cognitive neuroscience perspective. *Developmental Cognitive Neuroscience*, 2, Supplement 1, S30-S48.
- Strasburger, H. (2001). Converting between measures of slope of the psychometric function. *Perception & Psychophysics*, 63, 1348-1355.
- Strasburger, H. (2005). Unfocused spatial attention underlies the crowding effect in indirect form vision. *Journal of Vision*, 5, 1024-1037.
- Stuss, D. T., Shallice, T., Alexander, M. P. & Picton, T. W. (1995). A multidisciplinary approach to anterior attentional functions. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 769, 191-211.
- Styles, E. A. (2006). *The psychology of attention*. Hove: Psychology Press.
- Sugrue, L. P., Corrado, G. S. & Newsome, W. T. (2004). Matching behavior and the representation of value in the parietal cortex. *Science*, 304, 1782-1787.
- Supekar, K. & Menon, V. (2012). Developmental maturation of dynamic causal control signals in higher-order cognition: A neurocognitive network model. *PLoS Computational Biology*, 8, e1002374.
- Supekar, K., Musen, M. & Menon, V. (2009). Development of large-scale functional brain networks in children. *PLoS Biology*, 7, e1000157.
- Svenson, O. & Sjöberg, K. (1978). Subitizing and counting processes in young children. *Scandinavian Journal of Psychology*, 19, 247-250.
- Sylvester, C. M., Shulman, G. L., Jack, A. I. & Corbetta, M. (2009). Anticipatory and stimulus-evoked blood oxygenation level-dependent modulations related to spatial attention reflect a common additive signal. *Journal of Neuroscience*, 29, 10671-10682.

- Tamnes, C. K., Ostby, Y., Walhovd, K. B., Westlye, L. T., Due-Tønnessen, P. & Fjell, A. M. (2010). Neuroanatomical correlates of executive functions in children and adolescents: A magnetic resonance imaging (MRI) study of cortical thickness. *Neuropsychologia*, 48, 2496-2508.
- Thibault, D., Brosseau-Lachaine, O., Faubert, J. & Vital-Durand, F. (2007). Maturation of the sensitivity for luminance and contrast modulated patterns during development of normal and pathological human children. *Vision Research*, 47, 1561-1569.
- Thomas, K. M., King, S. W., Franzen, P. L., Welsh, T. F., Berkowitz, A. L., Noll, D. C. et al. (1999). A developmental functional MRI study of spatial working memory. *Neuroimage*, 10, 327-338.
- Thomason, M. E., Race, E., Burrows, B., Whitfield-Gabrieli, S., Glover, G. H. & Gabrieli, J. D. (2009). Development of spatial and verbal working memory capacity in the human brain. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 21, 316-332.
- Thompson, K. G., Biscoe, K. L. & Sato, T. R. (2005). Neuronal basis of covert spatial attention in the frontal eye field. *Journal of Neuroscience*, 25, 9479-9487.
- Thompson, T. W., Waskom, M. L., Garel, K. L., Cardenas-Iniguez, C., Reynolds, G. O., Winter, R. et al. (2013). Failure of working memory training to enhance cognition or intelligence. *PLoS One*, 8, e63614.
- Todd, J. J. & Marois, R. (2004). Capacity limit of visual short-term memory in human posterior parietal cortex. *Nature*, 428, 751-754.
- Toet, A. & Levi, D. M. (1992). The two-dimensional shape of spatial interaction zones in the parafovea. *Vision Research*, 32, 1349-1357.
- Toga, A. W., Thompson, P. M. & Sowell, E. R. (2006). Mapping brain maturation. *Trends in Neurosciences*, 29, 148-159.
- Tombu, M. & Jolicoeur, P. (2003). A central capacity sharing model of dual-task performance. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 29, 3-18.
- Tombu, M. & Seiffert, A. E. (2008). Attentional costs in multiple-object tracking. *Cognition*, 108, 1-25.
- Tombu, M. & Seiffert, A. E. (2010). Tracking planets and moons: Mechanisms of object tracking revealed with a new paradigm. *Attention, Perception, & Psychophysics*, 73, 738-750.
- Tootell, R. B., Hadjikhani, N., Hall, E. K., Marrett, S., Vanduffel, W., Vaughan, J. T. et al. (1998). The retinotopy of visual spatial attention. *Neuron*, 21, 1409-1422.
- Toth, L. J. & Assad, J. A. (2002). Dynamic coding of behaviourally relevant stimuli in parietal cortex. *Nature*, 415, 165-168.
- Treisman, A. M. & Gelade, G. (1980). A feature-integration theory of attention. *Cognitive Psychology*, 12, 97-136.
- Treue, S. (2012). Neuronale Grundlagen von Aufmerksamkeit. In H.-O. Karnath & P. Thier (Eds.), *Kognitive Neurowissenschaften* (pp. 323-330). Heidelberg: Springer.
- Treue, S. & Martinez-Trujillo, J. C. (1999). Feature-based attention influences motion processing gain in macaque visual cortex. *Nature*, 399, 575-579.
- Treutwein, B. & Strasburger, H. (1999). Fitting the psychometric function. *Perception & Psychophysics*, 61, 87-106.
- Trick, L. M., Audet, D. & Dales, L. (2003). Age differences in enumerating things that move: Implications for the development of multiple-object tracking. *Memory and Cognition*, 31, 1229-1237.

- Trick, L. M. & Enns, J. T. (1998). Lifespan changes in attention: The visual search task. *Cognitive Development*, 13, 369-386.
- Trick, L. M., Hollinsworth, H. & Brodeur, D. A. (2009). Multiple-object tracking across the lifespan: Do different factors contribute to diminished performance in different age groups? In D. Dedrick & L. M. Trick (Eds.), *Computation, cognition, and Pylyshyn* (pp. 79-99). Cambridge, MA: MIT Press.
- Trick, L. M., Jaspers-Fayer, F. & Sethi, N. (2005). Multiple-object tracking in children: The "Catch the Spies" task. *Cognitive Development*, 20, 373-387.
- Trick, L. M. & Pylyshyn, Z. W. (1994). Why are small and large numbers enumerated differently? A limited-capacity preattentive stage in vision. *Psychological Review*, 101, 80-102.
- Tsotsos, J. K. (1990). Analyzing vision at the complexity level. *Behavioral and Brain Sciences*, 13, 423-469.
- Tsotsos, J. K. (2005). The selective tuning model for visual attention. In L. Itti, G. Rees & J. K. Tsotsos (Eds.), *Neurobiology of attention* (pp. 562-569). San Diego, CA: Elsevier.
- Turner, M. L. & Engle, R. W. (1989). Is working memory capacity task dependent? *Journal of Memory and Language*, 28, 127-154.
- Uchida, Y., Kudoh, D., Murakami, A., Honda, M. & Kitazawa, S. (2012). Origins of superior dynamic visual acuity in baseball players: Superior eye movements or superior image processing. *PLOS One*, 7, e31530.
- Uddin, L. Q., Supekar, K. S., Ryali, S. & Menon, V. (2011). Dynamic reconfiguration of structural and functional connectivity across core neurocognitive brain networks with development. *Journal of Neuroscience*, 31, 18578-18589.
- Uhlhaas, P. J. (Ed.). (2011). *Das adoleszente Gehirn*. Stuttgart: Kohlhammer.
- van der Molen, M. W. (2000). Developmental changes in inhibitory processing: Evidence from psychophysiological measures. *Biological Psychology*, 54, 207-239.
- VanRullen, R., Carlson, T. & Cavanagh, P. (2007). The blinking spotlight of attention. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 104, 19204-19209.
- Vecchi, T., Monticellai, M. L. & Cornoldi, C. (1995). Visuo-spatial working memory: Structures and variables affecting a capacity measure. *Neuropsychologia*, 33, 1549-1564.
- Velanova, K., Wheeler, M. E. & Luna, B. (2008). Maturation changes in anterior cingulate and frontoparietal recruitment support the development of error processing and inhibitory control. *Cerebral Cortex*, 18, 2505-2522.
- Vergauwe, E., Barrouillet, P. & Camos, V. (2009). Visual and spatial working memory are not that dissociated after all: A time-based resource-sharing account. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 35, 1012-1028.
- Verstraten, F. A., Cavanagh, P. & Labianca, A. T. (2000). Limits of attentive tracking reveal temporal properties of attention. *Vision Research*, 40, 3651-3664.
- Vogel, E. K. & Machizawa, M. G. (2004). Neural activity predicts individual differences in visual working memory capacity. *Nature*, 428, 748-751.
- Vossel, S., Weidner, R., Driver, J., Friston, K. J. & Fink, G. R. (2012). Deconstructing the architecture of dorsal and ventral attention systems with dynamic causal modeling. *Journal of Neuroscience*, 32, 10637-10648.

- Wager, T. D., Sylvester, C. Y., Lacey, S. C., Nee, D. E., Franklin, M. & Jonides, J. (2005). Common and unique components of response inhibition revealed by fMRI. *Neuroimage*, 27, 323-340.
- Wainwright, A. & Bryson, S. E. (2002). The development of exogenous orienting: Mechanisms of control. *Journal of Experimental Child Psychology*, 82, 141-155.
- Wainwright, A. & Bryson, S. E. (2005). The development of endogenous orienting: Control over the scope of attention and lateral asymmetries. *Developmental Neuropsychology*, 27, 237-255.
- Wandell, B. A., Dumoulin, S. O. & Brewer, A. A. (2007). Visual field maps in human cortex. *Neuron*, 56, 366-383.
- Ward, B. D. (2000). Simultaneous inference for fMRI data. Retrieved June 21, 2012, from <http://afni.nimh.nih.gov/pub/dist/doc/manual/AlphaSim.pdf>.
- Waszak, F., Li, S. C. & Hommel, B. (2010). The development of attentional networks: Cross-sectional findings from a life span sample. *Developmental Psychology*, 46, 337-349.
- Watson, D. G., Maylor, E. A., Allen, G. E. & Bruce, L. A. (2007). Early visual tagging: Effects of target-distractor similarity and old age on search, subitization, and counting. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 33, 549-569.
- Wellcome Trust Center for Neuroimaging. (2009). SPM8 [Computer software]. Retrieved from <http://www.fil.ion.ucl.ac.uk/spm/software/spm8/>.
- Wendelken, C., Baym, C. L., Gazzaley, A. & Bunge, S. A. (2011). Neural indices of improved attentional modulation over middle childhood. *Developmental Cognitive Neuroscience*, 1, 175-186.
- Westlye, L. T., Walhovd, K. B., Dale, A. M., Bjørnerud, A., Due-Tønnessen, P., Engvig, A. et al. (2010). Differentiating maturational and aging-related changes of the cerebral cortex by use of thickness and signal intensity. *Neuroimage*, 52, 172-185.
- Whitney, D. & Levi, D. M. (2011). Visual crowding: A fundamental limit on conscious perception and object recognition. *Trends in Cognitive Sciences*, 15, 160-168.
- Wichmann, F. A. & Hill, N. J. (2001). The psychometric function: I. Fitting, sampling, and goodness of fit. *Perception & Psychophysics*, 63, 1293-1313.
- Wolfe, J. M. (1994). Guided search 2.0: A revised model of visual search. *Psychonomic Bulletin & Review*, 1, 202-238.
- Wolfe, R. & Hanley, J. (2002). If we're so different, why do we keep overlapping? When 1 plus 1 doesn't make 2. *Canadian Medical Association Journal*, 166, 65-66.
- Womelsdorf, T., Anton-Erxleben, K., Pieper, F. & Treue, S. (2006). Dynamic shifts of visual receptive fields in cortical area MT by spatial attention. *Nature Neuroscience*, 9, 1156-1160.
- Womelsdorf, T., Anton-Erxleben, K. & Treue, S. (2008). Receptive field shift and shrinkage in macaque middle temporal area through attentional gain modulation. *Journal of Neuroscience*, 28, 8934-8944.
- Womelsdorf, T., Fries, P., Mitra, P. P. & Desimone, R. (2006). Gamma-band synchronization in visual cortex predicts speed of change detection. *Nature*, 439, 733-736.
- Woodman, G. F. & Luck, S. J. (2004). Visual search is slowed when visuospatial working memory is occupied. *Psychonomic Bulletin & Review*, 11, 269-274.
- Worsley, K. J. (2007). Random Field Theory. In K. J. Friston, J. Ashburner, S. J. Kiebel & W. D. Penny (Eds.), *Statistical parametric mapping* (pp. 232-236). London: Elsevier Academic Press.



- Wurtz, R. H., McAlonan, K., Cavanaugh, J. & Berman, R. A. (2011). Thalamic pathways for active vision. *Trends in Cognitive Sciences*, 15, 177-184.
- Xu, Y. (2009). Distinctive neural mechanisms supporting visual object individuation and identification. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 21, 511-518.
- Xu, Y. & Chun, M. M. (2006). Dissociable neural mechanisms supporting visual short-term memory for objects. *Nature*, 440, 91-95.
- Yantis, S. (1992). Multielement visual tracking: Attention and perceptual organization. *Cognitive Psychology*, 24, 295-340.
- Yantis, S. (2008). The neural basis of selective attention: Cortical sources and targets of attentional modulation. *Current Directions in Psychological Science*, 17, 86-90.
- Yeshurun, Y. & Carrasco, M. (1998). Attention improves or impairs visual performance by enhancing spatial resolution. *Nature*, 396, 72-75.
- Yoncheva, Y. N., Blau, V. C., Maurer, U. & McCandliss, B. D. (2010). Attentional focus during learning impacts N170 ERP responses to an artificial script. *Developmental Neuropsychology*, 35, 423-445.
- Zelazo, P. D. (Ed.). (2004). *U-shaped changes in behavior and their implications for cognitive development*. Hove: Psychology Press.
- Zhou, H. & Desimone, R. (2011). Feature-based attention in the frontal eye field and area V4 during visual search. *Neuron*, 70, 1205-1217.
- Zorzi, M., Barbiero, C., Facoetti, A., Lonciari, I., Carrozzi, M., Montico, M. et al. (2012). Extra-large letter spacing improves reading in dyslexia. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 109, 11455-11459.
- Zychaluk, K. & Foster, D. H. (2009). Model-free estimation of the psychometric function. *Attention, Perception, & Psychophysics*, 71, 1414-1425.

## Anhang

### Anhang A

#### Experiment 1: Tabellen

**Tabelle A-1:** Absolute Schwellen der einzelnen Altersgruppen in der Object-Tracking-Aufgabe und Bootstrap-Konfidenzintervalle mit einer (Bonferroni-korrigierten) Überdeckungswahrscheinlichkeit von 98.75 %.

Altersgruppe	Schwellenwert	Konfidenzintervall	
		Untere Grenze	Obere Grenze
7 Jahre	8.62	7.83	9.54
9 Jahre	6.31	5.71	6.96
11 Jahre	4.96	4.33	5.41
13 Jahre	5.78	5.21	6.37
Erwachsene	3.32	2.90	3.75

**Tabelle A-2:** Dynamische Sehschärfe der verschiedenen Altersgruppen bestimmt mit lokaler linearer Regression und Bootstrap-Konfidenzintervalle mit einer (Bonferroni-korrigierten) Überdeckungswahrscheinlichkeit von 99.44 %.

Altersgruppe	Schwellenwert	Konfidenzintervall	
		Untere Grenze	Obere Grenze
7 Jahre	3.12	2.89	3.51
9 Jahre	3.95	3.75	4.24
11 Jahre	3.70	3.52	3.94
13 Jahre	3.63	3.48	3.87
Erwachsene	3.35	3.25	3.63

**Tabelle A-3:** Dynamische Sehschärfe der verschiedenen Altersgruppen bestimmt mit Signalentdeckungsmethoden und punktweise Konfidenzintervalle mit einer (Bonferroni-korrigierten) Überdeckungswahrscheinlichkeit von 99.44 %.

Altersgruppe	Schwellenwert	Konfidenzintervall	
		Untere Grenze	Obere Grenze
7 Jahre	2.56	1.88	3.25
9 Jahre	2.35	1.60	3.11
11 Jahre	2.73	1.99	3.47
13 Jahre	2.42	1.41	3.43
Erwachsene	2.04	0.83	3.25

## Anhang B

### Experiment 2: Tabellen

**Tabelle B-1:** Mit lokaler linearer Regression ermittelte absolute Schwellen der einzelnen Altersgruppen in der MOT-Aufgabe mit zwei Zielreizen und Bootstrap-Konfidenzintervalle mit einer (Bonferroni-korrigierten) Überdeckungswahrscheinlichkeit von 99.95 %.

Altersgruppe	Schwellenwert	Konfidenzintervall	
		Untere Grenze	Obere Grenze
7 Jahre	12.00	10.91	12.00
9 Jahre	7.77	6.63	8.73
11 Jahre	7.21	6.31	8.03
13 Jahre	6.57	5.75	7.17
Erwachsene	4.86	4.35	5.31

**Tabelle B-2:** Mit lokaler linearer Regression ermittelte absolute Schwellen der einzelnen Altersgruppen in der MOT-Aufgabe mit drei Zielreizen und Bootstrap-Konfidenzintervalle mit einer (Bonferroni-korrigierten) Überdeckungswahrscheinlichkeit von 99.95 %.

Altersgruppe	Schwellenwert	Konfidenzintervall	
		Untere Grenze	Obere Grenze
7 Jahre	10.67	6.67	10.67
9 Jahre	10.35	9.27	10.67
11 Jahre	9.36	8.10	10.67
13 Jahre	7.86	6.78	8.65
Erwachsene	6.02	4.69	7.54

**Tabelle B-3:** Mittlere individuelle Schwellenwerte der verschiedenen Altersgruppen bei zwei Zielreizen und Konfidenzintervalle mit einer (Bonferroni-korrigierten) Überdeckungswahrscheinlichkeit von 99.95 %.

Altersgruppe	Schwellenwert	Konfidenzintervall	
		Untere Grenze	Obere Grenze
7 Jahre	13.06	12.03	14.09
9 Jahre	9.49	8.19	10.79
11 Jahre	9.38	8.30	10.46
13 Jahre	7.36	6.48	8.24
Erwachsene	6.78	5.99	7.58

**Tabelle B-4:** Mittlere individuelle Schwellenwerte der verschiedenen Altersgruppen bei drei Zielreizen und Konfidenzintervalle mit einer (Bonferroni-korrigierten) Überdeckungswahrscheinlichkeit von 99.95 %.

Altersgruppe	Schwellenwert	Konfidenzintervall	
		Untere Grenze	Obere Grenze
7 Jahre	14.06	13.27	14.85
9 Jahre	12.44	11.43	13.44
11 Jahre	10.83	9.42	12.24
13 Jahre	10.36	8.94	11.79
Erwachsene	7.81	6.57	9.06

**Tabelle B-5:** Mittlere Differenzwerte der individuellen Schwellen von zwei und drei Zielreizen für die vier älteren Altersgruppen und Konfidenzintervalle mit einer Überdeckungswahrscheinlichkeit von 95 % (unkorrigiert).

Altersgruppe	Differenzwert	Konfidenzintervall	
		Untere Grenze	Obere Grenze
7 Jahre	1.00	0.09	1.91
9 Jahre	2.94	1.48	4.41
11 Jahre	1.45	0.22	2.68
13 Jahre	3.00	1.42	4.58
Erwachsene	1.03	0.08	1.98

**Tabelle B-6:** Mittlerer Matrix-Gesamtscore der verschiedenen Altersgruppen und 95 %-Konfidenzintervalle (unkorrigiert).

Altersgruppe	Matrix-Gesamtscore	Konfidenzintervall	
		Untere Grenze	Obere Grenze
7 Jahre	5.87	4.12	7.62
9 Jahre	8.9	6.88	10.95
11 Jahre	9.91	7.89	11.93
13 Jahre	10.52	8.60	12.45
Erwachsene	14.74	12.83	16.65

**Tabelle B-7:** Mittlerer Corsi-Gesamtscore der verschiedenen Altersgruppen und 95 %-Konfidenzintervalle (unkorrigiert).

Altersgruppe	Corsi-Gesamtscore	Konfidenzintervall	
		Untere Grenze	Obere Grenze
7 Jahre	25.83	20.98	30.68
9 Jahre	41.04	32.64	49.45
11 Jahre	47.83	38.57	57.08
13 Jahre	53.96	46.11	61.80
Erwachsene	60.83	53.67	67.99